

УДК 622.693.2.004.4

СПОСОБ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И СКЛОНОВ

Оника С.Г., Халявкин Ф.Г. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

В статье представлен способ прогноза устойчивости горных выработок и склонов на основе регистрации предвестников деформаций горных пород магнитометрическими методами.

Введение

Известен способ кинетического подхода к прогнозированию устойчивости техногенных и природных объектов, основанный на термофлуктуационной концепции разрушения [1]. В этом методе разрушение рассматривается как следствие накопления локальных микроразрушений в результате термофлуктуационной статистики в механически напряженном теле. Кинетический подход исходит из того, что время до разрушения объекта (ресурс долговечности) однозначно связано с накоплением поврежденности, задача состоит в том, чтобы найти наиболее удобную для регистрации меру поврежденности и ее связь с ресурсом долговечности. Однако определение временного параметра прогнозирования разрушения в рамках термофлуктуационной концепции в настоящее время реализуется косвенным расчетом посредством регистрации звуковых сигналов на пребывающих под нагрузкой лабораторных образцах, при котором оценивается запас времени до окончательного разрушения ограниченно устойчивых объектов в поле силы тяжести.

Ресурс долговечности ограниченно устойчивых объектов можно определять, фиксируя на поверхности неустойчивых объектов аномальные изменения напряженности магнитного поля очагов необратимой деформации (скрыто развивающихся поверхностей отрыва или скольжения) методом магнитодинамической интроскопии (МДИ) [2]. При применении МДИ используется регистрация и исследование постоянной составляющей напряженности геомагнитного поля. При этом осуществление магнитодинамического контроля производится посредством профильной разновысотной магнитной съемки полного вектора напряженности магнитного поля T или его вертикальной составляющей. Критическим параметром является коэффициент оползнеопасности, представляющий собой отношение разности напряженности магнитного поля, зафиксированной на разной высоте, к его среднему значению по результатам профильной съемки. Метод позволяет с точностью до суток прогнозировать оползневые явления. По данным автора метода, накопленные статистические данные показывают, что за 2-3 суток до начала движения оползня коэффициент оползнеопасности увеличивается на одну-две единицы [2].

Недостатком метода является отсутствие в методике расчета коэффициента оползнеопасности учета взаимодействия магнитного поля очагов необратимых деформаций с магнитным полем окружающей среды. Следствием этого является недостаточная надежность информации о сроках устойчивости контрольных объектов – осуществляется только краткосрочный прогноз, что существенно снижает возможность проведения противооползневых мероприятий и исключает возможность долго- и среднесрочного прогноза устойчивости.

Следовательно, актуальной является разработка способа определения ресурса долговечности ограниченно устойчивых объектов в поле силы тяжести, в котором путем учета взаимодействия магнитного поля деструктивных новообразований с магнитным полем окружающей среды достигается повышение надежности информации о сроках устойчивости контрольных объектов.

Результаты исследований

По нашему мнению, однозначно связанное с накоплением повреждений время до разрушения объекта определяется из функции, описывающей напряженность магнитного поля локальной части объекта в области деформации. Этот процесс рассматривается как следствие накопления микроразрушений, заполняемых намагниченным веществом окружающей среды, неизбежно заполняющим микротрещины различного характера в механически напряженном теле. При этом вновь возникающие в результате взаимодействия магнитных полей разрушаемого объекта и окружающей среды микротрещины тут же заполняются веществом среды, намагничиваемым в свою очередь, то есть, процесс накопления микротрещин в случае пластичных пород идет непрерывно, а непрерывно протекающие процессы можно описать некоторым уравнением или системой уравнений.

Все вещества по магнитным свойствам разделяются на три основные группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Диамагнитное вещество выталкивается в неоднородном магнитном поле, а в однородном – устанавливается перпендикулярно силовым линиям поля (диамагнетиком, в частности, является вода). Парамагнитное вещество втягивается неоднородным магнитным полем, а в однородном – устанавливается перпендикулярно силовым линиям поля (парамагнетиком, в частности, является воздух). В природе, как правило, магнитные поля неоднородны, поэтому намагничиваемые диамагнетики выталкиваются из намагничивающего поля, а намагничиваемые парамагнетики втягиваются намагничивающим полем, следовательно, диамагнитные и парамагнитные вещества постоянно находятся в неравновесном состоянии. С позиций такого подхода разрушение имеет два аспекта: магнитензионное зарождение микротрещины и переход к макроразрушению материала.

Элементарным актом разрушения является магнитензионное зарождение нестабильной микротрещины. Проникновение окружающей среды (воздух, влага) в область дефекта кристаллической решетки пребывающего в состоянии кажущейся устойчивости объекта приводит к развитию последней в силу создаваемого избыточного напряжения при миграции в теле намагниченного диа- или парамагнетика.

В некоторый момент происходит переход от зародышевых, начальных трещин к видимой деформации, соизмеримой с размерами тела, то есть происходит формирование очага необратимой деформации (ОНД). Энергия магнитного поля объекта перераспределяется таким образом, чтобы препятствовать нарушению целостности объекта. Однако, в наиболее ослабленных, в силу различных причин, местах ОНД продолжает прогрессировать, увеличиваясь в размерах, поскольку в область необратимой деформации постоянно осуществляется приток намагничиваемого вещества окружающей среды, находящегося в неравновесном состоянии, т. е. увеличивающего напряжение в теле, при этом намагниченная среда ОНД регистрируется наружным наблюдением. По достижении некоторой (критической) величины напряженности магнитного поля ОНД, отвечающей таким линейным размерам деформации, при которых опорная реакция внутри объекта не компенсирует действие силы тяжести, происходит разрушение объекта. При этом, в силу предопределенности процессов, время до разрушения (ресурс

долговечности) однозначно связано с накоплением поврежденности, а наиболее удобной для регистрации мерой поврежденности объекта является напряженность \vec{H} магнитного поля ОНД.

Таким образом, в разработанном нами методе прогнозирование осуществляется прямым расчетом времени до начала разрушения контрольного объекта посредством регистрации динамической составляющей аномального магнитного поля очагов деформации. Метод позволяет при известной критической напряженности значительно повысить надежность прогнозирования, осуществляя, наряду с краткосрочным прогнозом, средне- и долгосрочный прогнозы длительности устойчивого состояния контрольных объектов. Предлагаемый способ контроля устойчивости предусматривает:

- исследование аномальной динамической напряженности магнитного поля формирующихся поверхностей отрыва или поверхностей скольжения подвижных масс относительно неподвижных;

- определение минимальной глубины формирующихся поверхностей отрыва в случае фиксации на поверхности наблюдений одиночных экстремумов динамической напряженности магнитного поля или минимальной глубины и горизонтальной длины формирующихся поверхностей скольжения в случае фиксации на поверхности наблюдения двойных одноименных экстремумов магнитного поля;

- осуществление режимных наблюдений аномальной динамической напряженности магнитного поля с интервалом, обеспечивающим равенство разности напряженности магнитного поля предыдущих и последующих наблюдений в фиксированной точке контрольных аномалий. В случае формирующихся поверхностей отрыва режимные наблюдения производят в экстремальной точке контрольных аномалий, а в случае формирующихся поверхностей скольжения режимные наблюдения производят в точке поверхности наблюдений, лежащей на прямой, проходящей через два одноименных экстремума контрольных аномалий и находящейся со стороны монотонного изменения динамической напряженности магнитного поля на расстоянии:

$$L = \frac{I_1 - I_2}{2 \left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где I_1 – расстояние между одноименными экстремумами;

I_2 – половина горизонтальной длины формирующихся поверхностей скольжения;

h_{\max} / h_{\min} – отношение максимальной и минимальной глубин формирующихся поверхностей скольжения;

- определение критической напряженности магнитного поля, при которой нарушается целостность объектов, из выражения:

$$Z_c = \frac{h_{\min} \cdot Z_{\text{экс}}}{h_{\text{наб}}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{экс}}$ – экстремальное значение динамической напряженности магнитного поля над минимальной глубиной формирующихся поверхностей отрыва или скольжения;

h_{\min} – минимальная глубина формирующихся поверхностей отрыва или скольжения на момент регистрации напряженности магнитного поля $Z_{\text{экс}}$;

$h_{\text{наб}}$ – высота наблюдения аномальной динамической напряженности магнитного поля относительно поверхности ограниченно устойчивых объектов в поле силы тяжести;

- определение ресурса долговечности ограниченно устойчивых объектов в поле силы тяжести из выражения:

$$t = \frac{\Delta t_{k+1}^2}{\Delta k_{k+1} - \Delta t_k} \times \left[\left(\frac{\Delta t_{k+1}}{\Delta t_k} \right) \frac{2Z_{k+1} - (Z_k + Z_c)}{Z_k - Z_{k+1}} - 1 \right], \quad (3)$$

где Δt_k – интервал времени между $k+1$ -м и k -тым наблюдениями;

Δt_{k+1} – интервал времени между $k+2$ -м и $k+1$ -м наблюдениями;

Z_k – напряженность динамического магнитного поля k -го наблюдения, нТ;

Z_{k+1} – напряженность динамического магнитного поля $k+1$ -го наблюдения, нТ;

Z_c – критическая напряженность динамического магнитного поля, нТ.

Благодаря тому что на поверхности ограниченно устойчивых объектов в поле силы тяжести производятся режимные наблюдения динамической аномальной напряженности магнитного поля формирующихся поверхностей отрыва или поверхностей скольжения подвижных масс относительно неподвижных, становится возможным количественно учесть с достаточной для практики точностью динамику роста внутренних деформаций поверхностей отрыва или поверхностей скольжения.

Известно, что формирующаяся поверхность отрыва отображается в локальном магнитном поле динамической аномалией:

$$Z = \frac{\lambda \cdot h_{\text{мин}}}{x^2 + h_{\text{мин}}^2} T, \quad (4)$$

где λ – магнитная масса единицы длины поверхности отрыва;

$h_{\text{мин}}$ – глубина верхней кромки поверхности отрыва;

x – координата профиля вкрест простирания аномалии Z .

Полагая, что $\frac{1}{2} Z_{\text{экс}} = Z(x_{1/2})$, где $x_{1/2}$ – координата половины экстремальной напряженности поля, из системы:

$$\begin{cases} Z_{\text{экс}} = \frac{\lambda}{h_{\text{мин}}}; \\ \frac{1}{2} Z_{\text{экс}} = \frac{\lambda \cdot h_{\text{мин}}}{x_{1/2}^2 + h_{\text{мин}}^2} \end{cases} \quad (5)$$

получаем $h_{\text{мин}} = x_{1/2} \cdot Z_c = \frac{h_{\text{мин}} \cdot Z_{\text{экс}}}{h_{\text{наб}}}$, где Z_c – критическая напряженность динамического магнитного поля, когда поверхность отрыва достигает поверхности наблюдений, режимные наблюдения производятся в экстремальной точке.

В случае формирующейся поверхности скольжения, экстремальная точка напряженности магнитного поля над минимумом субвертикальной части поверхности

скольжения мигрирует в сторону монотонного изменения напряженности поля и достигает критического значения с достаточной для практики точностью на расстоянии

$L = \frac{I_1 - I_2}{2 \left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}} - 1 \right)}$ от эпицентральной минимальной глубине поверхности скольжения

экстремума, где I_1 – расстояние между одноименными экстремумами, I_2 – половина горизонтальной длины формирующейся поверхности скольжения, h_{\max} / h_{\min} – отношение максимальной и минимальной глубин формирующейся поверхности скольжения.

Известно, что горизонтальная часть поверхности скольжения отображается в локальном магнитном поле динамической аномалией $Z = 2I \left[\arctg \frac{x + I_2}{h_{\max}} - \arctg \frac{x - I_2}{h_{\max}} \right]$.

Получаем зависимости при $\frac{1}{2} Z_{\text{экс}} = Z(x_{1/2})$, $\frac{1}{4} Z_{\text{экс}} = Z(x_{1/4})$:

$$h_{\max} = k \frac{x_{1/2}}{2}; \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{x_{1/2}}{2} \sqrt{4 - k^2}, \quad (7)$$

где $k = \left(\frac{x_{1/4}}{x_{1/2}} \right)^2 - 1$, то есть, по характерным точкам аномалии величины h_{\max} и I_2 определяются однозначно, а определение критического значения Z_c остается без изменений.

Режимные наблюдения с интервалом, обеспечивающим равенство разности динамической напряженности магнитного поля предыдущих и последующих наблюдений, позволяют радикально упростить экстраполяцию напряженности динамического магнитного поля во временном интервале, что существенно повышает точность прогнозирования и оперативность результата.

Благодаря тому, что режимные наблюдения производятся в фиксированной точке на поверхности контрольных объектов, становится возможным трансформировать дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее динамику роста поверхности отрыва и скольжения, в обыкновенное дифференциальное уравнение, решением которого является прогностическая кривая, зависящая от времени, из которой определяется при определенном ранее критическом значении Z_c ресурс долговечности ограниченно устойчивых объектов в поле силы тяжести из выражения:

$$t = \frac{\Delta t_{k+1}^2}{\Delta k_{k+1} - \Delta k_k} \times \left[\left(\frac{\Delta t_{k+1}}{\Delta t_k} \right) \frac{2Z_{k+1} - (Z_k + Z_c)}{Z_k - Z_{k+1}} - 1 \right], \quad (8)$$

где Δt_k – интервал времени между $k+1$ -м и k -тым наблюдениями;

Δt_{k+1} – интервал времени между $k+2$ -м и $k+1$ -м наблюдениями;

Z_k – напряженность динамического магнитного поля k -го наблюдения, нТ;

Z_{k+1} – напряженность магнитного поля $k+1$ -го наблюдения, нТ;

Z_c – критическая напряженность магнитного поля, нТ.

Таким образом, благодаря предложенному методу стало возможным осуществление учета причинно-следственных связей между характером накопления внутренних деформаций в ограниченно устойчивых объектах в поле силы тяжести и временем развития этих деформаций, что обеспечивает повышение надежности информации о сроках устойчивости контрольных объектов и, как следствие, получение долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного прогнозов их устойчивого состояния с требуемой точностью.

Проникающая в область внутренних дефектов объектов, пребывающих в состоянии кажущегося равновесия, окружающая среда (воздух, влага) намагничивается под действием магнитного поля объекта и создает локальные перенапряжения, поскольку, как было отмечено выше, постоянно находится в неравновесном состоянии. Количественно этот процесс описывается дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\eta \cdot \Delta \bar{H} = \sum_{n=1}^2 t^{n-1} \cdot \frac{d^n \bar{H}}{dt^n}, \quad (9)$$

где \bar{H} – вектор напряженности магнитного поля очага необратимой деформации (или любая его составляющая);

η – коэффициент намагничивания.

В точке поверхности контрольного объекта, соответствующей эпицентру источника микроаномалий, уравнение (9) очень слабо зависит от времени и с достаточной для практики точностью распадается на два равенства:

$$\Delta \bar{H} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{H}}{dt} + t \frac{d^2 \bar{H}}{dt^2} = 0, \quad (11)$$

а в силу фиксации исследуемой точки на поверхности контрольного объекта, прогностическая кривая конкретного ОНД $\bar{H}(t)$ удовлетворяет обыкновенному дифференциальному уравнению. В частности, если при определении ресурса долговечности контрольного объекта используется вертикальная составляющая магнитного поля ОНД $Z(t)$, уравнение имеет вид:

$$\dot{Z} + t\ddot{Z} = 0. \quad (12)$$

Общее решение уравнения (12) содержит две произвольные постоянные. Одна постоянная имеет размерность напряженности магнитного поля и является собственным магнитным полем Z_s очага необратимой деформации (при различных геометрических особенностях ОНД следуют различные Z_s). Вторая постоянная имеет размерность времени и является длительностью становления детерминированного процесса деформаций локальной части контрольной структуры t_o , так как переориентация микро- и макроструктур вещества, определяющих его внешнее магнитное поле, требует конеч-

ного времени. Кроме этого, ОНД всегда формируется на каком-нибудь начальном уровне магнитного поля Z_n – локальном нормальном поле. С учетом вышесказанного, решение уравнения (12) имеет вид:

$$Z(t) = Z_n - Z_s \ln \frac{t}{t_o}. \quad (13)$$

Следовательно, эмпирическая кривая, построенная в результате наблюдений, является логарифмической функцией времени с постоянными Z_s и t_o , отвечающими конкретным параметрам контролируемого ОНД, определенной на некотором уровне значении магнитного поля Z_n . Целевым параметром является время развития деформации контрольных объектов. Обращая функцию (4), получаем:

$$t = t_o \exp \frac{Z_n - Z}{Z_s}. \quad (14)$$

Если в некоторый момент времени развития деформации $t = t_k$ напряженность магнитного поля в эпицентре очага необратимой деформации равна Z_k получаем:

$$t_k = t_o \exp \frac{Z_n - Z_k}{Z_s} \quad \text{или} \quad t_o = \exp \frac{Z_k - Z_n}{Z_s}. \quad (15)$$

Подставляя (6) в (5) получаем целевую функцию времени развития деформации:

$$t = t_k \exp \frac{Z_k - Z}{Z_s}, \quad (16)$$

не зависящую от локального нормального поля, в котором деформируется контрольный объект.

В целях обнаружения и контроля очагов необратимой деформации производится рекогносцировочная магнитная съемка исследуемых объектов. Эллиптические в плане локальные динамические микроаномалии свидетельствуют о наличии и росте внутренних деформаций, со временем приводящих к разрушению объектов. Существенным моментом методики режимных наблюдений является регистрация экстремального значения напряженности магнитного поля в фиксированной точке. Для этого в окрестности эпицентров динамических микроаномалий производится микромагнитная сетка со сгущающейся равномерной сетью наблюдений до получения экстремального значения напряженности магнитного поля. Зафиксировав на поверхности наблюдений точки с экстремальными значениями динамических микроаномалий, через промежутки времени, обеспечивающие в фиксированных точках контроль равенства разности предыдущих и последующих наблюдений, производят режимные измерения экстремальной напряженности магнитного поля очагов необратимой деформации. Данные заносятся в журнал наблюдений, возможные вариации напряженности магнитного поля исключаются посредством синхронных наблюдений на опорных точках с известным статическим магнитным полем.

Целевая функция времени развития деформаций (16) однозначно определяется

по трем точкам наблюдений в некоторые моменты времени t_k , t_{k+1} , t_{k+2} , для которых наблюдаемое магнитное поле связано соотношением:

$$Z_k - Z_{k+1} = Z_{k+1} - Z_{k+2}, \quad (17)$$

при известных интервалах наблюдений $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$, $\Delta t_{k+1} = t_{k+2} - t_{k+1}$.

Действительно, из (16) следует:

$$\begin{aligned} t_{k+1} &= t_k \exp \frac{Z_k - Z_{k+1}}{Z_s}; \\ t_{k+2} &= t_k \exp \frac{Z_k + Z_{k+2}}{Z_s}. \end{aligned} \quad (18)$$

Отсюда, согласно (17) и (18), получаем замкнутую систему уравнений:

$$\begin{cases} t_{k+1}^2 = t_k \cdot t_{k+2}; \\ t_{k+1} - t_k = \Delta t_k; \\ t_{k+2} - t_{k+1} = \Delta t_{k+1}, \end{cases} \quad (19)$$

а также собственное магнитное поле очага необратимой деформации:

$$Z_s = \frac{Z_k - Z_{k+1}}{\ln \frac{t_{k+1}}{t_k}}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (16) получаем:

$$t = t_k \left(\frac{t_{k+1}}{t_k} \right)^{\frac{Z_{k-z}}{Z_k - Z_{k+1}}}, \quad (21)$$

где z – переменная.

Считая время последнего наблюдения t_{k+2} началом отсчета искомого времени деформации контрольного объекта, из (21) получаем:

$$t = t_k \left(\frac{t_{k+1}}{t_k} \right)^{\frac{Z_{k-z}}{Z_k - Z_{k+1}}} - t_{k+2}. \quad (22)$$

Система уравнений (19) легко решается:

$$t_k = \frac{\Delta t_k^2}{\Delta t_{k+1} - \Delta t_k} \cdot t_{k+1} = \frac{\Delta t_k \cdot \Delta t_{k+1}}{\Delta t_{k+1} - \Delta t_k}; \quad (23)$$

$$t_{k+2} = \Delta t_{k+1} / \Delta t_{k+1} - \Delta t_k^2. \quad (24)$$

Подставляя результат решения системы (19) в предыдущее равенство, получаем:

$$t = \frac{\Delta t_{k+1}^2}{\Delta k_{k+1} - \Delta t_k} \left[\left(\frac{\Delta t_{k+1}}{\Delta t} \right) \frac{2Z_{k+1} - (Z_k + Z_c)}{Z_k - Z_{k+1}} - 1 \right]. \quad (25)$$

Из (4) вытекает, что любой очаг необратимой деформации с течением времени неограниченно увеличивается в размерах. Однако очевидно, что в таком случае с течением времени нарушается устойчивость объекта, и по достижению некоторого критического значения Z_c следует лавинообразный рост макротрещин, поскольку любые естественные или антропогенные образования находятся в постоянном действии поля силы тяжести, наступает разрушение материала (объекта). Определение критического значения Z_c является весьма тонкой расчетной операцией, которая требует конкретного подхода в каждом конкретном случае со всесторонним анализом как особенностей контрольного объекта, так и динамических параметров ОНД в зависимости от его характера. По определению Z_c получаем зависимость:

$$t = \frac{\Delta t_{k+1}^2}{\Delta k_{k+1} - \Delta t_k} \times \left[\left(\frac{\Delta t_{k+1}}{\Delta t} \right) \frac{2Z_{k+1} - (Z_k - Z_c)}{Z_k - Z_{k+1}} - 1 \right]. \quad (26)$$

Равенство (26) позволяет определить ресурс долговечности ограниченно устойчивых объектов в поле силы тяжести при помощи системы режимных наблюдений динамической напряженности магнитного поля очагов необратимой деформации.

Преимуществом способа является относительность измерений напряженности без использования нормального (или любого базисного) магнитного поля, что обеспечивает большую точность и производительность, так как при режимной съемке достаточно использовать цифровые данные показаний ΔZ магнитометра (без пересчета в нанотесла) и требуемый масштаб времени (часы, дни, недели, месяцы, годы).

Под влиянием изменения внешних условий режим накопления деформаций может изменяться в процессе их генезиса, однако в этом случае закон формирования ОНД в механически напряженном теле (9) остается неизменным, изменяются лишь начальные и граничные условия для уравнения (9), что может привести к некоторым вариациям целевой функции (13) в силу изменения постоянных t_0 и Z_s . Следовательно, в любом случае система режимных наблюдений обеспечивает достоверность определения ресурса долговечности деформируемых объектов.

Заключение

Для сложных условий эксплуатации месторождений разработан оперативный способ прогноза опасных оползневых деформаций на основе регистрации предвестников деформаций горных пород магнитометрическими методами.

Список использованных источников

1. Шурков, Н.С. Можно ли прогнозировать разрушения? / Н.С. Шурков, В.С. Куксенко, В.А. Петров // Будущее науки. – 1983. – Т. 16. – С. 43-47.
2. Соболев, В.Г. Прогноз и контроль оползневых процессов на месторождениях / В.Г. Соболев // Горный журнал. – 1989. – № 3. – С. 43-47.

Onika S.G., Khalyavkin F.G.

The forecast way of mine workings and slopes stability

The article presents the forecast way of the stability of mine workings and slopes on the basis of registration of rocks deformation forerunners by means of magnetometric methods.

Поступила в редакцию 13.12.2010 г.