

## **РАЗВИТИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

*А. М. Самедов, докт. техн. наук (НТУУ «КПИ»), А. А. Ткачук, инж. (ассоциация «Укрсахкамень»)*

*Розглянуто вплив гідротермальних умов на утворення і розвиток тектонічних порушень масиву, що призводять до зсувних явищ в режимі в'язкопластичної течії. Математично модельовано процеси переміщення в'язкопластичного масиву, викликані зволоженням його гарячою водою і тектонічними порушеннями.*

Высокая температура от тепловых сооружений проникает на большую глубину грунтового массива (более 30 м), нагревая подземную воду, вызывает интенсивное движение горячей воды в порах и трещинах горной породы, ускоряет возникновение и развитие тектонических нарушений в массиве.

Тектонические нарушения массива взаимосвязаны с активизацией геодинамических процессов, в частности оползней. Оползни (естественные и антропогенные) причиняют весьма значительный ущерб народному хозяйству. Особенно крупные масштабы оползневые подвижки приобретают при неравномерном рельефе местности. Среди современных оползней особенно часто встречаются оползни-потоки – смещения поверхностных земляных масс в пределах глубины сезонных колебаний влажностей и температур.

Вопросы развития оползневых явлений, разжижения грунтов при увлажнении освещены в работах [1–6] и др. Отмечается, что разжижение грунтов и оползни нарушают экологическое равновесие и причиняют огромный ущерб народному хозяйству.

Факторами, объединяющими оползневые процессы с тектоническими нарушениями горных пород, являются развитие трещин при набухании и усадке, высокая скорость смещения и большая зависимость от атмосферных осадков, выветривание и растворение горных пород, которые в результате влияния горячей воды переходят в разжиженное состояние в граничном слое.

Под влиянием теплой и горячей воды в сочетании с выветриванием и тектоническими нарушениями, приводящими к оползневым процессам, происходит направленное изменение химического и минералогического состава горных пород, их дисперсности, обменной способности и гидрофильности, содержания растворимых солей, находящихся в породе в твердом состоянии в поровом растворе, физических, структурно-механических и реологических свойств пород.

Наблюдения за оползневыми явлениями показывают, что в оползнях происходят значительные изменения порового давления, которые вызывают изменения напряженного состояния склона, состоящего из горных пород с

тектоническими нарушениями, разрушение структурных связей и скачкообразное падение вязкости на несколько порядков, особенно в результате влияния горячей воды.

В массиве с тектоническими нарушениями основную роль в изменении устойчивости склона играет водонасыщение, которое периодически меняется, достигая критических значений. Поэтому после стадии первичного смещения наступает стадия периодической активности. Если не происходит подмыва или подрезки языка оползня, то возможно затухание процесса и наступление стадии стабилизации массива. Процессы выветривания тектонически нарушенных горных пород подготавливают условия либо для активизации старого оползня за счет накопления рыхлых масс, либо для образования нового оползня I-го порядка с захватом ранее не смещавшихся масс, расположенных глубже, чем старая поверхность смещения.

Тектонические нарушения от гидротермальных условий, выветривания и выщелачивания способствуют росту оползня вглубь склона. По мере тектонических нарушений и выветривания коренных глинистых горных пород в зонах отрыва под влиянием горячей воды и движения в смещения вовлекаются все новые массы элювия. Развитие оползня-потока можно увидеть на участке, где находятся тепловые сооружения. Такие оползни-потоки характерны для склонов, сложенных из аргиллита и аргиллитоподобных глин, особенно вблизи промышленных печей и тепловых сооружений. Оползни-потоки имеют в основном затухающий характер. В дождливые периоды скорость движения может достигать до десятков и даже сотен сантиметров в сутки.

В области трещиноватости и тектонических нарушений, возникших на склоне, резко повышается общая водопроницаемость горных пород под влиянием горячей воды и происходит местное нивелирование пьезометрического уровня, тогда как в расположенной выше части склона он остается неизменным. Поэтому возникающие значения гидравлического градиента имеют местный и временный характер. Здесь увеличивается сдвигающая сила и уменьшается устойчивость полосы массива, расположенной над трещиноватой зоной. Если принять, что уклон местности равен  $\alpha$  и в нетрещиноватом массиве поверхность потока параллельна склону, то гидравлический градиент  $I = \operatorname{tg}\alpha$ . В трещиноватой и тектонически нарушенной зоне гидравлический градиент  $I_1$  будет значительно больше, чем  $I$ . Поэтому возникает разность уровней, и в переходной (от нетрещиноватой к трещиноватой) зоне в голове потока развивается объемная фильтрационная сила  $j$ , равная

$$j = \gamma_w I,$$

где  $\gamma_w$  – объемная масса воды.

Эта сила направлена параллельно поверхности пьезометрического уровня, и величина ее вполне достаточна, чтобы вызвать оползневые явления. При этом развивается новая трещиноватость и тектонические нарушения в склоне.

В современных геоморфологических и климатических условиях, а также вследствие влияния горячей воды при активном тектоническом режиме происходит интенсивное разрушение не только в твердых горных породах, но и в глинистых породах в процессе выветривания. В коре выветривания, а также в формирующихся за счет разрушения глинистых пород элювиально-делювиальных образованиях развиваются различные физико-геологические явления: оползни, поверхностный смыв, линейная эрозия, набухания и усадки и т.д.

Как правило, оползневые деформации на склонах с тектонически нарушенными породами вследствие влияния гидротермальных условий охватывают не только зону разуплотненных выветренных пород коренной основы, но вовлекают в движение и чехол делювиальных отложений. Делювиальные отложения чаще всего состоят из суглинков, глины с примесью обломков осадочных пород.

Оползни-потоки в большинстве случаев формируются в глинистых грунтах, подверженных набуханию–усадке и размоканию при действии горячей воды. Чаще они происходят там, где под слоем рыхлых покровных образований имеется толща коренных пород, обладающих значительно меньшей проницаемостью.

Движение массива с тектоническими нарушениями в оползнях-потоках происходит по различным причинам и зависит от многих факторов, главными из которых являются изменения вязкости породы при увлажнении горячей водой и влияние температур от тепловых сооружений, влияние трещин усадки и растяжения.

В оползнях-потоках покровных образований с тектоническими нарушениями вязкость в основном зависит от колебаний влажности и температуры воды на разных глубинах смещающегося слоя. Стационарные наблюдения за рядом оползней показывают, что эти колебания в поверхностном слое массива достаточно велики и зависят от многих факторов, поэтому закономерности распределения влажности удастся установить лишь приблизительно. Проскальзывание массива с тектоническими нарушениями возникает, когда вода (особенно теплая или горячая), попавшая в трещины, создает на контакте выветренных слоев смазку из размокшего грунта. Импульсом, вызывающим начало движения, может быть гидростатическое давление в трещинах. Блоки массива скользят, подобно твердым телам, по слою смазки до тех пор, пока не происходит изменение уклона или характера распределения влажности. Последнее связано с тем, что после начала смещения затрудняется поступление атмосферной влаги в контактную зону. Трещины в нижней части закрываются быстрее всего, и уровень максимального обводнения поднимается вверх. Происходит общее увеличение влажности слоя, в том числе и за счет миграции горячей воды и смазки. Оползень либо останавливается, либо начинается течение массива. По мере перемещения оползня в приконтактной зоне тектонических нарушений накапливаются разрушения. Здесь массив грунта испытывает максимальные деформации, и за счет потери структурной связности, повышения порового давления и дополнительного увлажнения горячими грунтовыми водами может возникнуть

пограничный слой с относительно малой вязкостью. Тогда характер течения становится иным. В этом случае проскальзывание выглядит как течение пограничного слоя, переносящего на себе вышележащую вязкопластичную массу грунта.

Коэффициент вязкости глин от полутвердой до мягкопластичной консистенции находится в пределах  $\eta = 5 \cdot 10^9 \dots 5 \cdot 10^{14}$  Па·с. При такой вязкости массив на ровном участке может смещаться на расстояние от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в год, а при оползнях-потоках вязкость изменяется от  $\eta = 1,3 \cdot 10^2$  Па·с до  $5 \cdot 10^4$  Па·с. При  $\eta = 1,3 \cdot 10^2$  Па·с скорость сползания при среднем уклоне местности достигает до 6 ... 20 м/сут.

Течения потока могут быть такими, что в верхней части сползает слой грунта с тектоническими нарушениями при относительно малой влажности. В нижележащем слое вязкость может изменяться с изменением влажности и температуры по глубине согласно зависимости

$$\eta(z) = \eta_0 e^{-2az}, \quad (1)$$

где  $\eta_0$  – значение вязкости на контакте в неподвижном слое грунта;  $a$  – коэффициент, получаемый на основании данных наблюдений за режимом влажности и экспериментального определения зависимости  $\eta$  от влажности;  $z$  – глубина сползающего слоя.

Эта закономерность изменения вязкости по глубине характерна тем, что влажность в поверхностном слое меняется по параболическому закону, а зависимость вязкости от влажности может быть выражена по логарифмическому закону в виде

$$\lg \eta = 16,3 - 20,1W, \quad (2)$$

где  $W$  – влажность грунта.

Уравнение равномерного движения массива при оползнях-потоках с принятой переменной по высоте вязкостью  $\eta(z)$  может быть получено путем преобразования дифференциального уравнения Навье–Стокса

$$\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} - 2a \frac{\partial V_x}{\partial z} = - \frac{X}{\eta(z)}. \quad (3)$$

В случае установившегося движения оползня-потока массива указанное уравнение можно заменить уравнением движения вязкопластичной среды

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} + F_x = 0, \quad (4)$$

где связь между напряжениями и скоростями деформаций описывается уравнениями

$$\tau_{xy} = \left[ \eta(z) + \frac{\tau_0}{H} \right] \frac{\partial V_x}{\partial y};$$

$$\tau_{xz} = \left[ \eta(z) + \frac{\tau_0}{H} \right] \frac{\partial V_x}{\partial z}; \quad (5)$$

$$H = \sqrt{\left( \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_x}{\partial z} \right)^2}.$$

Граничные условия имеют вид

$$V_x \left. \begin{array}{l} = 0 \\ z=0 \\ y=0 \\ y=B \end{array} \right| \frac{\partial V_x}{\partial z} = 0, \text{ где } Z_0 = H - \frac{\tau_0 - T_x}{x - \sin \alpha}. \quad (6)$$

Решение нелинейных дифференциальных уравнений (3) весьма затруднительно. Поэтому вносим упрощения, а это возможно, если считать  $\tau_{xy} = \tau_{xz}$ . Тогда

$$\frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{\partial V_x}{\partial z};$$

$$\tau_{xy} = \tau_{xz} = \begin{cases} \eta(z) \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\tau_0}{\sqrt{2}} \\ \eta(z) \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{\tau_0}{\sqrt{2}} \end{cases} = \begin{cases} \eta(z) \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\tau_0}{\sqrt{2}} \\ \eta(z) \frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\tau_0}{\sqrt{2}} \end{cases}. \quad (7)$$

В первом уравнении (7)  $\frac{\partial V_x}{\partial y} > 0$  или  $\frac{\partial V_x}{\partial z} > 0$ ; во втором  $\frac{\partial V_x}{\partial y} < 0$  или  $\frac{\partial V_x}{\partial z} < 0$ . В таком случае

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \eta(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} = \eta(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} + \eta'(z) \frac{\partial V_x}{\partial z}. \quad (8)$$

Поскольку  $\eta' = -2a\eta(z)$ , то

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} = \eta(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} - 2a\eta(z) \frac{\partial V_x}{\partial z}. \quad (9)$$

Тогда уравнения (4) можно представить в виде

$$\eta(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \eta(z) \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} - 2a\eta(z) \frac{\partial V_x}{\partial z} = -F_x \quad (10)$$

или

$$\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} - 2a \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{X}{\eta(z)}. \quad (11)$$

Решив уравнения (11), можно определить скорость течения оползня-потока.

Для определения скорости скольжения массива рассмотрим краевую задачу со следующими начальными и граничными условиями:

$$V(y, h_0) = V_1, \quad \frac{\partial V}{\partial z}\Big|_{z=0} = 0, \quad (0 \leq y \leq b); \quad (12)$$

$$\frac{\partial V}{\partial y}\Big|_{y=0} = \frac{\partial V}{\partial y}\Big|_{y=b} = 0, \quad (0 \leq z \leq h_0),$$

где  $h_0$  – высота до пограничного слоя.

Решение задачи (11) по условиям (12) будем искать в виде  $V = V(z)$ . Оно всегда удовлетворяет краевым условиям (12) при  $y = 0$  и  $y = b$ . Для  $V = V(z)$  задача имеет вид

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{\eta'(z)dV}{\eta(z)dz} = -\frac{X}{\eta(z)}; \quad (13)$$

$$V'(0) = 0, \quad V(b) = V_1. \quad (14)$$

Сначала определим линейно независимые решения однородного уравнения

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{\eta'(z)}{\eta(z)} \cdot \frac{dV}{dz} = 0. \quad (15)$$

Одним из очевидных решений данного уравнения является функция  $V_1(z) = \text{const}$ , поэтому далее полагаем  $V_1(z) = 1$ . Для отыскания второго решения, линейно независимого от  $V_1(z)$ , применим способ понижения порядка для уравнения (15). Приходим к выражению вида

$$V_2(z) = \int_0^z \frac{dS}{\eta(S)}.$$

Таким образом, линейно независимые решения однородного уравнения (15) имеют вид

$$V_1(z) = 1, \quad V_2(z) = \int_0^z \frac{dS}{\eta(S)}. \quad (16)$$

Общее решение неоднородного уравнения (13) находим из формулы

$$V = C_1(z) + C_2(z)V_2(z), \quad (17)$$

где  $C_1(z)$  и  $C_2(z)$  – произвольные функции, которые определяем по известному методу вариации постоянных из системы линейных дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} C'(z) + C'_2(z)V_2(z) &= 0 \\ C'_1(z)0 + C'_2(z)\frac{1}{\eta(z)} & \end{aligned} \right\},$$

откуда

$$C'_1(z) = XV_2(z);$$

$$C'_2(z) = C_2 + Xz,$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные.

Подставляя  $C_1(z)$  и  $C_2(z)$  в (17), получаем общее решение уравнения (13) в виде

$$V = C_1 + C_2 \int_0^z \frac{dS}{\eta(S)} + X \int_0^z \left[ \int_0^\tau \frac{dS}{\eta(S)} \right] d\tau - Xz \int_0^z \frac{dS}{\eta(S)};$$

$$\frac{dV}{dz} = \frac{C_2 - Xz}{\eta(z)}.$$

Отсюда с учетом первого краевого условия (12) заключаем, что  $C_2 = 0$ .

Итак, решение задачи (12)–(14) имеет вид

$$V = C_1 + X \int_0^z \left[ \int_0^\tau \frac{dS}{\eta(S)} \right] d\tau - Xz \int_0^z \frac{dS}{\eta(S)}, \quad (18)$$

причем

$$V_1(z) = -\frac{Xz}{\eta(z)}. \quad (19)$$

В выражении (18) повторный интеграл можно свести к определенной переменной порядка интегрирования. Тогда имеем

$$\int_0^z \left[ \int_0^\tau \frac{dS}{\eta(S)} \right] d\tau = \int_0^z \frac{dS}{\eta(S)} \int_0^\tau d\tau = z \int_0^z \frac{dS}{\eta(S)} - \int_0^z \frac{SdS}{\eta(S)}.$$

После таких преобразований из (18) следует:

$$V = C_1 - X \int_0^z \frac{SdS}{\eta(S)}. \quad (20)$$

Определим постоянную  $C_1$  из условия  $V(h_0) = V_1$ . Из (20) и (14) имеем равенство

$$C_1 = V_1 + X \int_0^{h_0} \frac{SdS}{\eta(S)}.$$

Таким образом, решение задачи (11), (12) принимает вид

$$V = V_1 + X \int_0^{h_0} \frac{SdS}{\eta(S)}. \quad (21)$$

Согласно (19) и поскольку  $\eta(z) > 0$ , функция  $V(z)$  монотонно убывает при  $0 \leq z \leq h_0$ , так что

$$V_{\max} = V_1 + X \int_0^{h_0} \frac{SdS}{\eta(S)}. \quad (22)$$

Предположим, что вязкость в пограничном слое  $h_0$  изменяется по степенному закону

$$\eta(z) = (Az + B)^\alpha, \quad (23)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $\alpha$  – положительные постоянные, вытекающие из экспериментальных исследований.

Подберем  $A$  и  $B$  так, чтобы выполнялись условия  $\eta(0) = \eta_1$ ,  $\eta(h_0) = \eta_0$ . Для этого достаточно предположить

$$A = \frac{1}{h_0} \left( \eta_1^{1/\alpha} - \eta_0^{1/\alpha} \right); \quad B = \eta_1^{1/\alpha}. \quad (24)$$

Для нахождения наибольшей скорости движения массива при оползневом явлении следует вычислить интеграл

$$I = \int_0^{h_0} \frac{SdS}{(AS + B)^\alpha}. \quad (25)$$

Примем  $\alpha = 1$ , тогда

$$I = \frac{h_0}{A} - \frac{B}{A^2} \ln \frac{Ah_0 + B}{B}.$$

Отсюда с учетом (24) для  $\alpha = 1$  получаем

$$\int_0^{h_0} \frac{SdS}{\eta(S)} = \frac{h_0^2}{\eta_0 - \eta_1} - \frac{h_0^2 \eta_1}{(\eta_0 - \eta_1)^2} \ln \frac{\eta_0}{\eta_1}. \quad (26)$$

Аналогично при  $\alpha = 2$

$$\int_0^{h_0} \frac{SdS}{\eta(S)} = \frac{h_0^2}{\sqrt{\eta_0} - \sqrt{\eta_1}} \left[ \frac{\ln \frac{\eta_0}{\eta_1}}{2\sqrt{\eta_0} - \sqrt{\eta_1}} - \frac{1}{\sqrt{\eta_0}} \right]. \quad (27)$$

Наконец, из (23)...(25) при  $\alpha \neq 1$  и при  $\alpha \neq 2$  имеем:

$$I = \frac{1}{(2-\alpha)A^2} \left[ (Ah_0 + B)^{2-\alpha} - B^{2-\alpha} \right] - \frac{B}{(1-\alpha)A^2} \left[ (Ah_0 + B)^{1-\alpha} - B^{1-\alpha} \right].$$



Поскольку  $B = \eta_1^{1/\alpha}$ ,  $Ah_0 + B = \eta_0^{1/\alpha}$ , то при указанных значениях  $\alpha$  рассматриваемый интеграл выражается через начальную и конечную вязкость:

$$\int_0^{h_0} \frac{SdS}{\eta(S)} = \frac{h_0^2}{(\alpha-1)(\alpha-2)\left(\eta_0^{1/\alpha} - \eta_1^{1/\alpha}\right)^2} \left[ \eta_1^{\frac{2-\alpha}{\alpha}} + (1-\alpha)\eta_0^{\frac{2-\alpha}{\alpha}} + (\alpha-2)\eta_1^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \eta_1 \right]. \quad (28)$$

Из формул (26)–(28) следует, что наибольшая скорость проскальзывания при уменьшении начальной вязкости  $\eta_0$  будет только при  $\alpha \geq 2$ , то есть для

$\alpha = 2$  она растет как  $\ln \frac{\eta_0}{\eta_1}$  и для  $\alpha > 2$  – по степенному закону  $\eta_1^{\frac{2-\alpha}{\alpha}}$ . Например, при  $\eta_1 = 10$  и  $\eta_0 = 10^6$  Па·с  $V_{\max} = 1870$  м/сут.

Таким образом, максимальная скорость  $V_{\max}$  движения массива при тектонических нарушениях, зависящих от вязкости верхнего слоя при увлажнении горячей водой, является функцией начальной скорости  $V_1$ , вязкости верхнего слоя  $\eta(S)$ , мощности верхнего слоя  $S$ , высоты пограничного слоя от поверхности массива  $h_0$  и переменной высоты массива  $X$ .

При правильной оценке колебаний вязкости, связанных с увлажнением массива грунта, можно прогнозировать размеры оползневых зон и скорость смещения в случае тектонических нарушений, которая может достигать 1870 м/сут и больше.

### Выводы

1. Высокая температура от тепловых сооружений проникает на большую глубину, нагревая подземную воду до кипения, способствует интенсивному движению подземных вод, ускоряет образование и развитие тектонических нарушений массива горных пород.

2. Тектонические нарушения массива тесно связаны с оползневыми явлениями, которые вовлекают его в вязкопластическое течение, нарушая экологическое равновесие окружающей среды.

3. Математически смоделированы движения вязкопластического массива в виде оползней-потоков, возникающих от влияния гидротермальных условий. Составлены и решены уравнения движения оползня-потока под действием тектонических нарушений массива.

1. Емельянова Е. П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. – 310 с.

2. Куликов Н. П., Шадунц К. Ш. Вязкое течение несомого пласта с учетом упругого закрепления краев. – Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1976. – № 7.

3. Шадунц К. Ш. Оползни-потоки. – М.: Недра, 1983. – 120 с.

4. Самедов А. М., Ган А. Л., Исмаилов Т. Смещение разжиженного массива вдоль линии подпорных стен. – Miedzynarodowa konferencja VI Szkoła Geomechaniki, Gliwice-Ustron. – 2003. – С. 151–158.

5. Разжижение пылеватых песков, супесей и суглинков при фильтрационных воздействиях /А. М. Самедов, А. Л. Ган, Т. Исмаилов, М. Озчелик / Вісник ЖДТУ. – Вип. 3(27). – 2003. – С. 204–208.

6. Самедов А. М., Кравец В. Г., Ткачук А. А. Экологические последствия действия высокотемпературных подземных вод на горные породы. – Zeszyty naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Gornictwo. – Z. 270. – Nr. 1. – 2005. – С. 153–158.