



**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ
ОПОЛЗНЕВОЙ МАССЫ СУГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ЮГА КЫРГЫЗСТАНА**

С. Б. Омуралиев

*Институт геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики,
E-mail: Sagynd.omuraliev@yandex.ru, ул. Медерова 98, г. Бишкек 720052, Кыргызстан*

Изучены физико-механические свойства грунта с места схода оползня в лабораторных условиях. Решена задача при допущении, что масса оползня до и после схода остается неизменной. Рассчитана величина оползневой массы. Путем построения различных поверхностей скольжения и определения для каждой из них коэффициента устойчивости установлена наиболее опасная поверхность скольжения. Выявлено, что для обеспечения безопасности жилых поселков и других объектов, расположенных у основания оползневых склонов, необходимо знать расстояние, которое пройдет оползень при полной разгрузке. Найдена дальность смещения оползневых масс на горизонтальном участке.

Выемочный столб, штрек, угольный целик, численное моделирование, подземные выработки, разрушение пород, напряжения, деформации

**MATHEMATICAL MODELING OF MASS LANDSLIDE
MOVEMENT OF LOAMY SOILS IN SOUTH KYRGYZSTAN**

S. B. Omuraliev

*Institute of Geomechanics and Subsoil Development, National Academy of Sciences, Kyrgyz Republic,
E-mail: Sagynd.omuraliev@yandex.ru, ul. Mederova 98, Bishkek 720017, Kyrgyzstan*

The physical and mechanical properties of soil from the place of landsliding are studied in laboratory conditions. The problem is solved under the assumption that the landslide mass before and after landsliding remains unchanged. The value of the landslide mass is determined. By constructing various possible sliding surfaces and determining stability factor for each of them, the most dangerous sliding surface was found. To ensure the safety of residential settlements and other objects located at the base of landslide slopes, it is necessary to know the distance that the landslide will travel when fully unloaded. The distance of displacement of landslide masses in the horizontal section is determined.

Extraction pillar, entry, coal pillar, numerical modeling, underground workings, rock failure, stresses, strains

На территории Кыргызской Республики широко распространены оползневые процессы. Они наносят огромный материальный ущерб народному хозяйству, а иногда приводят к человеческим жертвам. Анализ причин оползневых деформаций показывает, что одной из основных причин их возникновения являются атмосферные осадки. В данной работе рассматривается случай, когда нарушение равновесия происходит из-за сильного увлажнения грунта, вызванного дождем (снегом). Подавляющее большинство оползней на территории юга Кыргызстана развивается на горных склонах, покрытых с поверхности мощным чехлом лёссов и лёссовидных суглинков.

Точное очертание линии скольжения для простейших случаев из-за недостаточной изученности самого механизма природы оползневого явления до настоящего времени не установлено. Поэтому, для территории юга Кыргызстана изучение смещений суглинистых грунтов от атмо-

ферных осадков является актуальной проблемой. Цель работы — определение дальности смещения оползневой массы при наиболее опасной линии скольжения для минимального снижения материального ущерба.

При движении по склону оползневые массы, вследствие уменьшения его крутизны, теряют скорость и останавливаются на пологих или равнинных поверхностях у подножия склона, проходя значительные расстояния. Для обеспечения безопасности жилых поселков, сельскохозяйственных угодий и других объектов, расположенных у основания оползневых склонов, необходимо знать расстояние, которое пройдет оползень при полной разгрузке [1].

Математическая модель и методы исследования. В работе [1] задача решается при допущении, что масса оползня до и после схода остается неизменной. Схематический чертеж представлен на рис. 1.

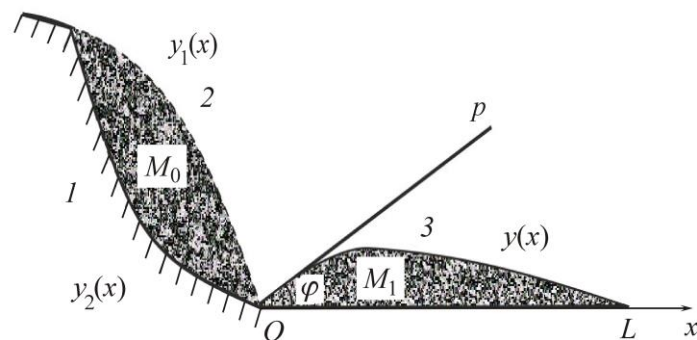


Рис. 1. Течение со срезом и разжижением в массе глинистых или лёссовых образований при увлажнении талыми, дождевыми водами (потоп, спływ): 1 — суглинистый массив; 2 — поверхность склона до оползания; 3 — оползшая масса пород; M_0 и M_1 — оползневые массы до и после схода; $y_1(x)$, $y_2(x)$ — поверхности склона и скольжения; $y(x)$ — функции траектория смещения оползневой массы; OL — дальность смещения оползневой массы; φ — угол внутреннего трения грунта (после схода оползня угол между касательной Op и оси Ox)

Пусть до схода оползневая масса M_0 описывается выражением:

$$M_0 = \rho_{\text{гр}} \int_0^{l^*} (y_1(x) - y_2(x)) dx, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{гр}}$ — плотность грунта, кН/м^3 ; l^* — длина склона, м.

Предположим, что оползневые массы до и после схода равны:

$$M_0 = M_1. \quad (2)$$

Оползневое тело движется под углом наклона линии скольжения α к горизонтальной плоскости с массой M_1 . Отметим начало координат O в начальном положении точки оползневой массы. Тогда масса M_1 имеет следующий вид

$$M_1 = \rho_{\text{гр}} \int_0^L (y(x) - A) dx, \quad (3)$$

где $y(x)$ — функция траектории смещения оползневой массы; $y = A$ — прямая, параллельная оси Ox .

Будем искать геометрическую форму оползневой массы после схода в виде функции

$$y(x) = -ax^2 + bx + c, \quad (4)$$

где a , b , c — неизвестные постоянные действительные числа.

Неизвестные постоянные в уравнении (4) определены в [1] и получено уравнение верхней границы оползневого тела:

$$y(x) = -ax^2 + bx = \left(x - \frac{x^2}{L}\right) \operatorname{tg} \varphi. \quad (5)$$

Зная геометрическую форму оползня, определим массу

$$M_1 = \rho_{\text{гр}} \int_0^L (-ax^2 + bx - A) dx.$$

Считаем $A = 0$, т. е. $y = 0$ совпадает с дневной поверхностью. Тогда M_1 примет вид:

$$M_1 = \rho_{\text{гр}} \int_0^L (-ax^2 + bx) dx = \rho_{\text{гр}} \frac{L^2 \operatorname{tg} \varphi}{6}. \quad (6)$$

Используя условие равенства масс оползня после и до схода (2), находим горизонтальную составляющую дальности смещения оползневой массы

$$L = \sqrt{\frac{6M_0}{\rho_{\text{гр}} \operatorname{tg} \varphi}}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), получим уравнение траектории оползневого смещения

$$y(x) = \left(x - \frac{x^2}{L}\right) \operatorname{tg} \varphi = x - \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}} \operatorname{tg} \varphi}{6M_0}} x^2. \quad (8)$$

В работе [1] величина оползневой массы M_0 не определена. Для вычисления массы оползня до схода сначала необходимо найти в неустойчивом склоне наиболее опасную поверхность скольжения. Склон сложен однородными суглинками, критическая поверхность скольжения неизвестна. Собственный вес склона обусловлен водонасыщенным грунтом в результате инфильтрации атмосферных осадков (дождь, снег).

В работе [2] оползневое давление E определяется как разность между сдвигающими S_i и удерживающими R_i силами, которые описываются выражениями:

$$S_i = P_i \sin \alpha_i \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha_i + \varphi)}, \quad R_i = (P_i \operatorname{tg} \varphi \cos \alpha_i + cl_i) \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha_i + \varphi)}. \quad (9)$$

Здесь S_i , R_i — соответственно сдвигающие и удерживающие силы, кН; P_i — собственный вес склона, обусловленный водонасыщенным грунтом, кН; l_i — длина отрезка линии скольжения, м; α_i — угол наклона линии скольжения к горизонту, отсчитываемый от оси x против часовой стрелки, град.; φ — угол внутреннего трения грунта, град.; c — сцепление грунта; индекс, кН/м²; i — текущий номер элементарного отсека единичной толщины.

Воспользовавшись дифференциальным представлением углов наклона линий скольжения:

$$\cos \alpha_i = \frac{1}{\sqrt{1 + y_2'^2}}, \quad \sin \alpha_i = \frac{y_2'^2}{\sqrt{1 + y_2'^2}}, \quad (10)$$

после соответствующих подстановок и ряда преобразований, получим зависимость, определяющую приращение оползневого давления E для элементарного отсека при произвольной форме линий скольжения

$$E_i - E_{i-1} = F(x, y_2, y_2') \Delta x. \quad (11)$$

Выражение, определяющее приращение оползневого давления E , имеет вид

$$F(x, y_2, y_2') = [\gamma_{\text{гр}}(1 - m) + \gamma_b m] (y_2 - y_1) \left[\frac{y_2' + \operatorname{tg} \varphi}{1 - y_2' \operatorname{tg} \varphi} - \mu \right] - c \frac{1 + y_2'^2}{1 - y_2' \operatorname{tg} \varphi}, \quad (12)$$

где $\gamma_b, \gamma_{гр}$ — соответственно удельный вес дождевых вод и грунта, кН/м^3 ; m — пористость грунта, д. ед.; $y_1 = y_1(x)$ — поверхность склона; $y_2 = y_2(x)$ — неизвестная линия скольжения; μ — коэффициент динамической сейсмичности, который при расчете естественных склонов принимает значения: при сейсмическая балльности района 1–6 — 0, 7 — 0.025, 8 — 0.05, 9 — 0.10, 10 — 0.25, 11 — 0.50, 12 — более 0.75. При расчете искусственных откосов значения этого коэффициента следует увеличивать приблизительно в 1.5 раза [3].

Получаем выражение E в произвольном сечении x склона в виде интеграла

$$E = \int_{x_0}^x F(x, y_2, y_2') dx, \quad (13)$$

где x_0 — координата, соответствующая начальной точке оползнеопасного блока.

В результате вычисления частных производных и выполнения необходимых преобразований уравнение Эйлера [4, 5] для функционала (13) принимает вид

$$2y_2''(1 + \text{tg}^2 \varphi) \{ [\gamma_{гр}(1-m) + \gamma_b m](y_2 - y_1) \text{tg} \varphi - c \} - (1 - y_2' \text{tg} \varphi) \{ [\gamma_{гр}(1-m) + \gamma_b m] \{ (1 - y_2' \text{tg} \varphi)(y_2' + \text{tg} \varphi - \mu(1 - y_2' \text{tg} \varphi)) - (y_2' - y_1')(1 + \text{tg}^2 \varphi) \} \} = 0. \quad (14)$$

Так как дифференциальное уравнение (14) второго порядка, для его решения задается положение начальной точки и начальный наклон линии скольжения.

Коэффициент устойчивости склона определяется на кривой скольжения $y_2(x)$ по формуле

$$K_y = \frac{\int_{x_0}^x R(x, y_2, y_2') dx}{\int_{x_0}^x S(x, y_2, y_2') dx} = \frac{\int_{x_0}^x \left((\gamma_{гр}(1-m)(y_1 - y_2) + \gamma_b m(y_1 - y_2)) \frac{\text{tg} \varphi}{1 - y_2' \text{tg} \varphi} + c \frac{1 + y_2'^2}{1 - y_2' \text{tg} \varphi} \right) dx}{\int_{x_0}^x \left((\gamma_{гр}(1-m)(y_1 - y_2) + \gamma_b m(y_1 - y_2)) \left(\mu - \frac{y_2'}{1 - y_2' \text{tg} \varphi} \right) \right) dx}, \quad (15)$$

т. е. K_y — функционал, зависящий от выбора функции $y_2(x)$.

В качестве примера выбран однородный суглинистый грунт. Водно-физические и физико-механические свойства грунта имеют значения: $m = 0.42$ д. ед., $\varphi = 10^\circ$, $c = 20 \text{ кН/м}^2$, $\gamma_{гр} = 18 \text{ кН/м}^3$, $\gamma_b = 10 \text{ кН/м}^3$, коэффициент динамической сейсмичности $\mu = 0.05$. Путем построения различных поверхностей скольжения и расчета для каждой из них коэффициента устойчивости установлена наиболее опасная поверхность скольжения — 5 с углом $\alpha = 72^\circ$, представленная на рис. 2. Ей соответствует минимальный коэффициент $K_y = 0.98$, следовательно данный массив является неустойчивым.

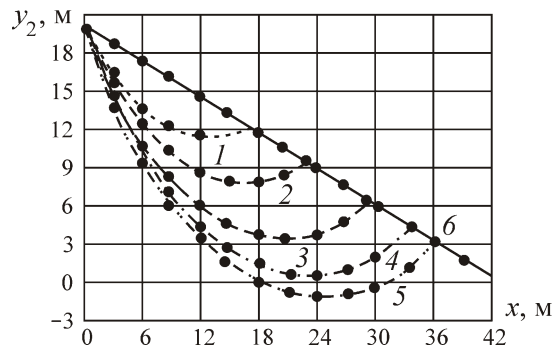


Рис. 2. Линии скольжения оползневого склона: 1–5 — линии скольжения; 6 — поверхность склона

Полученные данные расчета $y_1(x)$ и $y_2(x)$ подставляем в уравнение (1) и находим величину оползневой массы M_0 . По формуле (7) определяем дальность смещения оползневых масс на горизонтальном участке.

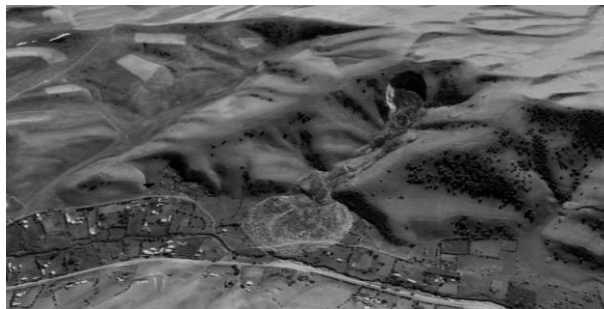


Рис. 3. Общая площадь пораженного оползнеопасного склона

В качестве примера расчета рассмотрен оползневый склон в с. Алмалуу-Булак (Сузакский район), который показан на рис. 3. Оползневое тело сложено суглинками, протяженность оползневой массы составляет 273 м, общая площадь продольного сечения склона $14\,952\text{ м}^2$, объем $522\,194\text{ м}^3$, угол внутреннего трения $\varphi = 10^\circ$ и дальность смещения оползневой массы 695 м, вычисленная по формуле (7) она составляет 726 м, т. е. погрешность расчета не превышает 4.5 %.

ВЫВОДЫ

Путем построения различных поверхностей скольжения и определения для каждой из них коэффициента устойчивости установлена наиболее опасная поверхность скольжения. Дифференциальное уравнение второго порядка применимо для однородных грунтов, у которых прочностные характеристики оползневой массы одинаковы по всей длине поверхности скольжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Dzhamanbaev M. J. and Omuraliev S. B.** On the application of the value of the landslide mass of slopes to determine the distance of its displacement, part 1, Journal of the Kyrgyz State Technical University, 2019, no. 2 (50), pp. 269–274. [Джаманбаев М. Дж., Омуралиев С. Б. О применении величины оползневой массы склонов для определения дальности его смещения Ч. 1 // Известия КГТУ. — 2019. — № 2 (50). — С. 269–274.]
2. **Ginzburg L. K.** Landslide holding structures, Moscow, Stroyizdat, 1979, 80 pp. [Гинзбург Л. К. Противооползневые удерживающие конструкции. — М.: Стройиздат, 1979. — 80 с.]
3. **Recommendations** for the choice of methods for calculating the slope stability coefficient and landslide pressure, Moscow, 1986. [Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления. — М., 1986.]
4. **Elsgolts L. E.** Differential equations and calculus of variations, Moscow, Nauka, 1969, 421 pp. [Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. — М.: Наука, 1969. — 421 с.]
5. **Lanczos K.** Variational principles of mechanics, per. from English V. F. Gantmacher; ed. L. S. Polak, Moscow, Mir, 1965, 408 pp. [Ланцош К. Вариационные принципы механики / Пер. с англ. В.Ф. Гантмахера; под ред. Л. С. Полака. — М.: Мир, 1965. — 408 с.]