

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-44-49

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ОПОЛЗНЕЙ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА LANDSLIDE MODELLER

STUDY OF LANDSLIDES BEHAVIOR ON THE BASIS OF LANDSLIDE MODELLER SOFTWARE

Воробьев Александр Егорович¹,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: fogel_al@mail.ru

Vorobiev Alexander E., D. Sc., Professor

Нифадьев Владимир Иванович²,

доктор техн. наук, академик НАН КР

Nifadiev Vladimir I., Dr. Sc., Academician of the National Academy

of Sciences of the Kyrgyz Republic

Усманов Салават Фаргатович²,

доктор техн. наук, доцент

Usmanov Salavat F., D. Sc., Associate Professor

¹Институт повышения квалификации руководящих сотрудников топливно-энергетического комплекса Министерства энергетики РФ, г. Раменское, Донинское шоссе 4

¹Institute of Management Personnel Development of the Fuel and Energy Complex of the RF Ministry of Energy, 4 shosse Doninskoye, Ramenskoye

²Кыргызско-Российский Славянский университет, 720000, г. Бишкек, Киевская 44

²Kyrgyzsko-Russian Slavic University, 720000, Bishkek, 44 street Kievskaya

Аннотация. Отмечена угроза увеличения числа и масштабов чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, среди которых особое значение имеют сели и оползни. На сегодняшний день на территории Кыргызской Республики выявлено свыше 5000 оползнеопасных участков. При этом оползни возникают как на природных склонах, так и на горно-технологических откосах карьеров. Выявлены основные причины потери устойчивости откосов и склонов в условиях Кыргызстана. Разработана методика оценки устойчивости горного массива на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния. Для практического решения задачи моделирования оползневого процесса был разработан программный комплекс Landslides Modeller. Представлен результат моделирования оползня на откосах борта карьера. Разработанная методика моделирования движения оползня и программное обеспечение позволяет оценить не только устойчивость горного склона, но и его объем и расстояние распространения.

Abstract. It has been noted that there is a threat of increase in number and scale of emergency situations of natural and technogenic character among which mudflows and landslides are of particular importance. As of today, in the territory of the Kyrgyz Republic they found over 5000 sites prone to landslides. Thus, landslides arise both on natural slopes, and on open-cast technological slopes. The main reasons for loss of stability by slopes and banks in the conditions of Kyrgyzstan are established. The technique for estimation of rock mass stability was developed based on numerical modeling of the stress-strain behavior. The Landslide Modeller software program was developed for the practical solution of a problem of landslide process modeling. The result of a landslide modeling on the open pit slopes is presented. The developed technique of modeling the landslide movement and the software make it possible to estimate not only the hillside stability, but also its volume and distance of propagation.

Ключевые слова: оползни, моделирование, программный комплекс, методики

Keywords: landslides, modeling, software product, techniques

В настоящее время существует угроза увеличения числа и масштабов чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Следует отметить недостаточную эффективность средств и методов реагирования, а также предупреждения различных чрезвычайных ситуаций, среди кото-

рых особое значение имеют сели и оползни.

На сегодняшний день на территории Кыргызской Республики выявлено свыше 5000 оползнеопасных участков. Оползни возникают как на природных склонах, так и на горно-технологических откосах карьеров. В республике

разрабатывается несколько месторождений открытым способом. Среди них крупное золоторудное месторождение Кумтор. Обеспечение устойчивости бортов карьеров, отвалов и дамб является важнейшей задачей. Кроме этого необходимо обеспечивать устойчивость горных каньонов и плотин гидроэлектростанций. Актуальным является прогнозирование устойчивости искусственно созданных откосов на высокогорных автодорогах страны.

При неблагоприятном сочетании разнообразных факторов массив горных пород, ограниченный откосом или склоном, может перейти в неравновесное состояние и потерять устойчивость.

Основными причинами потери устойчивости откосов и склонов в условиях Кыргызстана являются:

- устройство недопустимо крутого откоса или подрезка склона, находящегося в состоянии, близком к предельному;
- увеличение внешней нагрузки (возведение сооружений, складирование материалов на откосе или вблизи его бровки);
- изменение внутренних сил (увеличение удельного веса грунта при возрастании его влажности или, напротив, влияние взвешивающего давления воды на грунты);

- неправильное назначение расчетных характеристик прочности грунта или снижение его сопротивления сдвигу за счет, например, повышения влажности;

- проявление гидродинамического давления, сейсмических сил, различного рода динамических воздействий (движение транспорта, забивка свай и т.п.);

- буровзрывные работы на карьерах вблизи критического откоса.

Так произошедший 12 августа 2015 г. оползень на откосе по дороге Бишкек-Балыкчи (рис. 1) принес значительный экономический ущерб. По счастливой случайности обошлось без человеческих жертв на одной из самых загруженных трасс республики, связывающей две области со столицей.

В селе Алмалык Ошской области 13 сентября 2015 года примерно в 21⁰⁰ был зафиксирован сход оползня. Длина участка смещения около 800 м, расстояние от стенки отрыва до подошвы оползня около 200 м, средняя мощность около 15 м. Языковая часть оползня перекрыла русло безымянного селеносного сая, тем самым создавая дополнительную угрозу затопления приусадебных участков и жилых домов при прохождении селевых потоков.

В настоящее время прогнозу оползневых яв-



Рис. 1. Оползень на дороге «Бишкек – Балыкчи» (Кыргызстан)



Рис. 2. Оползень у села Алмалык (Кыргызстан)

лений уделяется большое внимание. Вместе с тем, ещё недостаточно изучена особенность механизма оползневых явлений в условиях высокогорья, слабо развиты методы и средства прогнозирования на основе спутникового и полевого мониторинга.

В Кыргызско-Российском Славянском университете разрабатывается методика оценки устойчивости горного массива на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния. Моделирование выполняется на основе метода конечных элементов. Расчет ведётся на многопроцессорном вычислительном кластере (суперкомпьютер). Использование такого компьютера позволяет решать пространственные и динамические задачи.

Для решения задачи моделирования оползневого процесса разработан программный комплекс *LandslideModeller*. Он предназначен для численного моделирования оползней и обрушений с использованием пространственно-дискретизированных уравнений структурной динамики. С целью достоверного прогноза подвижек оползней, проводилось тестирование вычислительных алгоритмов, заложенных в программу *LandslideModeller*, на основе известных численных решений существующих математических моделей оползневых процессов.

В настоящее время для расчета скоростей и амплитуд смещений применяются следующие основные группы математических моделей [1-3], базирующиеся на различных подходах к механизмам зарождения и развития оползней:

- модели на основе вязкопластической среды;
- гидравлические модели;
- модели на основе гранулированных сред.

Мелкие грязевые оползни могут быть описаны в рамках моделей первой группы. В моделях второй группы используются усложненные уравнения, учитывающие сухое трение между отдельными слоями и трение между телом оползня и его подошвой. Общее между моделями этой группы является то, что оползневый поток представляет собой жидкость с неньютоновыми свойствами. Подобные модели достаточно точно описывают насыщенные глиной или грязью потоки, где частицы хорошо сцеплены и их столкновение непосредственно между собой затруднено. Модели на основе теории гранулированных сред [4-6] основаны на предположении, что оползневый поток состоит из отдельных частиц (гранул) различного размера.

Гранулированная среда представляет собой совокупность дискретных частиц, и должна удовлетворять следующим требованиям:

- количество частиц достаточно большое для образования потока;
- высокая концентрация частиц обеспечивает их частые столкновения.

Столкновение частиц на все время их взаимо-

действия представляется как затухающая пружинно-массовая система с трением, направленным по касательной к точке соприкосновения частиц. Движение каждой из составляющей оползень частиц описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка с учетом контактного взаимодействия с другими частицами и внешних массовых сил. Эффективный коэффициент трения представляет собой себя возрастающую функцию, зависящую от скорости сдвига, а материал, который находится в начале движения наверху оползня, остается там же и в оползневых отложениях. В натуральных условиях это справедливо для крупных фрагментов, которые находились на поверхности оползня в начале движения.

Более сложные модели на основе гранулированных сред учитывают взаимодействие частиц между собой в зависимости от того, какие силы - вязкие или взаимных столкновений - оказывают большее воздействие на динамику потока.

Было проведено моделирование движения оползня как потока частиц по наклонной поверхности. В начальный момент движения оползня считается, что смещающаяся часть грунтового массива расщепляется в поток частиц, распространяющихся по склону. Взаимодействие с воздухом на боковых границах пренебрежимо мало. Движение потока подвержено действию силы тяжести. Предполагается, что нет внешних притоков массы. Движение оползня описывается с помощью системы уравнений Навье – Стокса и закона сохранения массы [7-8]:

$$\begin{cases} \frac{Du}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \mu \nabla^2 \vec{u}, \\ \frac{Dv}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \mu \nabla^2 \vec{u}, \\ \frac{Dw}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \mu \nabla^2 \vec{u} + g, \\ \frac{D\rho}{Dt} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где: x, y, z - декартовы координаты;

u, v, w - составляющие вектора скорости \vec{u} ;

t - время;

ρ - плотность потока;

P - давление;

μ - коэффициент вязкости;

g - ускорение свободного падения.

При использовании метода частиц основные уравнения движения трансформируются в уравнения для взаимодействующих частиц. Предполагается, что все взаимодействия между частицами ограничены конечным объемом r_c , и вне данного радиуса частицы не взаимодействуют. В таком случае, вычислительная сложность пересчета значений неизвестной функции на каждом временном шаге равна $O(NM)$, где N - общее число частиц,

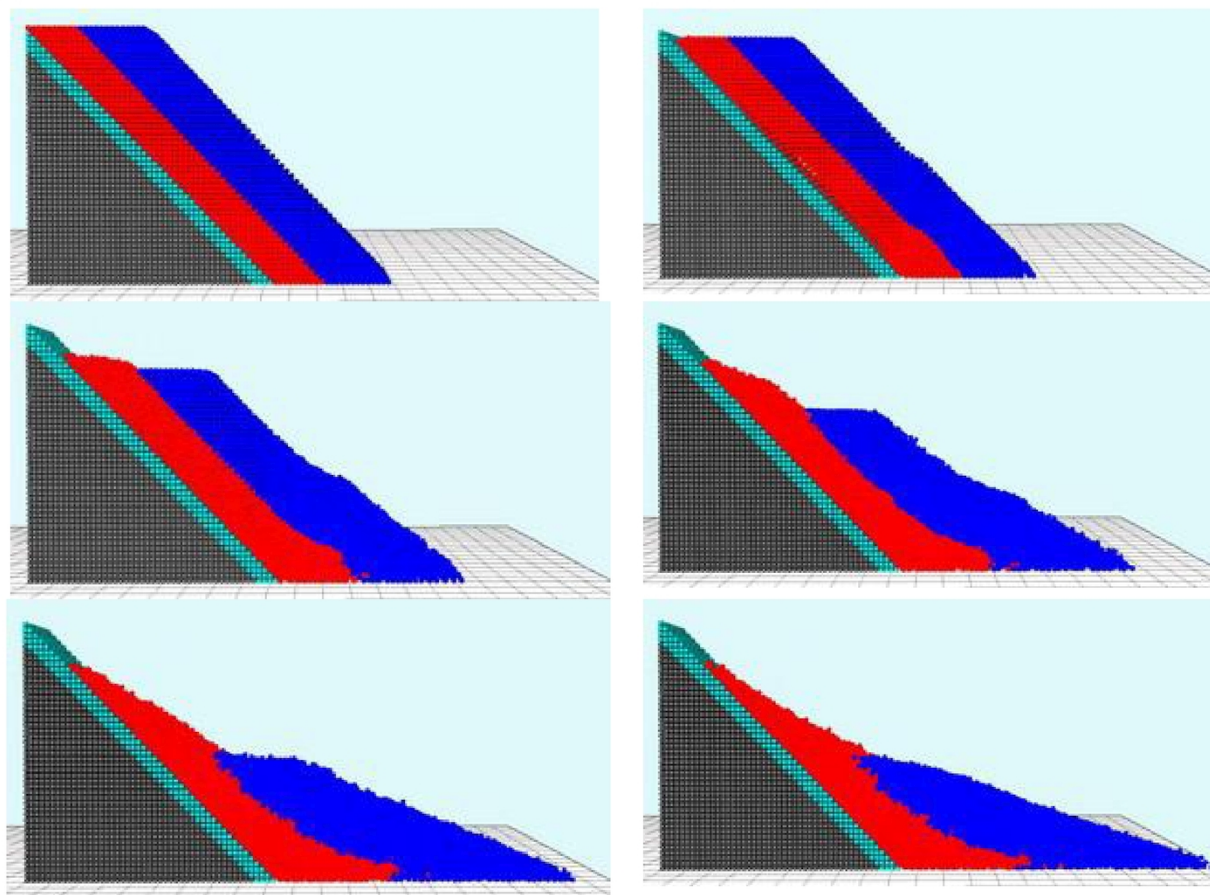


Рис. 3. Моделирование движения оползня методом частиц

M – число взаимодействующих частиц. Неизвестная функция представляется в виде конечной суммы δ -функций Дирака:

$$\phi(\vec{x}) = \sum_i^M m_i \frac{\rho_i}{\rho_i} \delta(\vec{x} - \vec{x}_i), \quad (2)$$

где: m_i , ρ_i , \vec{x}_i – масса, плотность и положение частицы i соответственно.

В соответствии с уравнением (2) плотность потока вычисляется следующим образом:

$$\rho(\vec{x}) = \sum_i^M m_i \delta(\vec{x} - \vec{x}_i). \quad (3)$$

Давление потока вычисляется с помощью уравнения состояния:

$$P = P_0 + k(\rho - \rho_0), \quad (4)$$

где: P_0 , ρ_0 – давление и плотность покоящегося потока.

Чтобы просчитать уравнения сохранения импульса, необходимо выразить оператор градиента и лапласиан, которые используются для вычисления сил давления и вязкости, действующих на частицы. Тогда составляющие за счет силы давления и вязкости вычисляются следующим образом:

$$F_i^{press} = \sum_i^M m_i \frac{P_i + P_j}{2\rho_i} \nabla \delta_{press}(\vec{r}_i - \vec{r}_j),$$

(5)

$$F_i^{vis} = \mu \sum_i^M m_i \frac{u_i - u_j}{\rho_i} \nabla \delta_{vis}(\vec{r}_i - \vec{r}_j),$$

(6)

где \vec{r}_i , \vec{r}_j – положения взаимодействующих частиц i и j соответственно.

Весовые функции для давления, вязкости и других членов вычисляются следующим образом:

$$\nabla \delta_{press}(\vec{r}) = \frac{45}{\pi r_e^6} (r_e - |\vec{r}|)^3 \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}, \quad (7)$$

$$\nabla \delta_{press}(\vec{r}) = \frac{45}{\pi r_e^6} (r_e - |\vec{r}|), \quad (8)$$

$$\delta(\vec{r}) = \frac{345}{64\pi r_e^9} (r_e^2 - |\vec{r}|^2)^3. \quad (9)$$

Значения функций вне радиуса взаимодействия r_e равны 0. Для реализации граничных условий использовались неподвижные граничные частицы. Считается, что частицы рассматриваемого потока находятся на расстоянии d от граничных частиц. Если при расчете частица i подходит к границе ближе чем на расстояние d , то со стороны граничной частицы на неё действует сила давления в направлении $\vec{n}(\vec{r}_i)$. В таком случае, сила

давления вычисляется следующим образом:

$$F_i^{press} = m_i \frac{\Delta \vec{x}_i}{dt^2} = m_i \frac{(d - |\vec{r}_{iw}|) \vec{n}(\vec{r}_i)}{dt^2}, \quad (10)$$

где $|\vec{r}_{iw}|$ - расстояние от частицы i до граничной частицы.

Данный метод не требует гладкости решения и позволяет использовать для моделирования неравномерную пространственную сетку. На каждой временной итерации выполняется последовательность из следующих шагов:

- определение радиуса взаимодействия r_c для каждой частицы;
- вычисление плотности потока и скоростей частиц;
- перерасчет положения частиц по схеме Эйлера.

Алгоритм был реализован в программное обеспечение, и на его основе проведено математическое моделирование движения оползневых потоков на трехмерной дискретной модели (рис. 3). Вертикальная секция грунта представлена в виде набора элементов, отражающая характерный вид оползня. Передняя плоскость оползня наклонена под углом 45° к горизонту, размер гранул составляет 0.5 м. Максимальные горизонтальные сдвиги возникают в правой нижней части передней плоскости оползня на всех стадиях его развития. Максимальные вертикальные сдвиги наблюдаются в верхней части модели. Компоненты смещения грунта меняют свои относительные значения по мере развития оползня. Горизонтальные смещения превышают вертикальные сдвиги в начальных стадиях активизации оползня, однако после того как произошла активизация оползня, вертикальные смещения доминируют над горизонтальными смещениями.

На рис. 4 представлен результат моделирования оползня на откосах борта карьера. В результате моделирования, можно оценить, как распространяется горная масса на участке карьера и последствия обрушения. На практике подобное моделирование помогает спрогнозировать контролируемое обрушение.

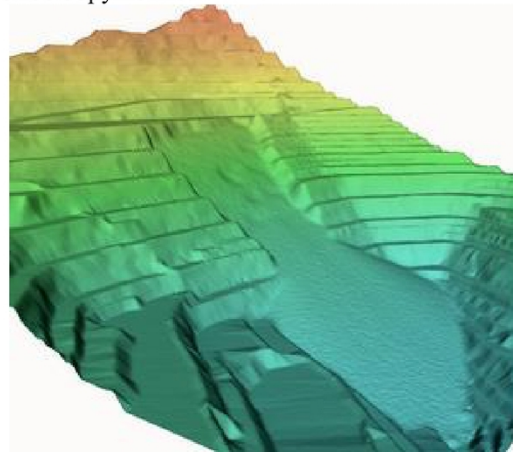


Рис. 4. Моделирование обрушения участка борта карьера

Таким образом, разработанная методика моделирования движения оползня и программное обеспечение позволяет оценить не только устойчивость горного склона, но и его объем и расстояние распространения. Трехмерное моделирование максимально приближено к реальному динамическому геомеханическому процессу. Современные технические и программные средства позволяют оценить опасность обрушений склонов в сложных условиях высокогорья Кыргызской Республики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорян С.С., Нилов Н.Н., и др. Математическое моделирование горных обвалов и оползней больших объемов. Инженерная геология, 1983, N 6.
2. Емельянова Е.Д. Основные закономерности оползневого процесса. - М.: Недра, 1972.
3. Дранников А.М. Оползни. Типы, причины образования, меры борьбы. Киев, 1956.
4. Campbell C.S. Rapid granular flows. Annu. Rev. Flu Mech. 1990. V. 22. P. 57-92.
5. Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P. The physics of Granular materials. Physics Today. 1996. V. 1.
6. Savage S.B., Hutter K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. J. Fluid Mech. 1999, 177-215.
7. Богомолов С.В., Захаров Е.В., Зеркаль С.В. Математическое моделирование движения оползня-потока методом частиц. МДОЗМФ-001. - Херсон, 2001.
8. Harada, T., Koshizuka, S. and Kawaguchi, Y. Smoothed Particle Hydrodynamics on GPUs. In Proceedings of Computer Graphics International (June 2007, Petropolis Brazil)

REFERENCES

1. Grigorjan S.S., Nilov N.N., i dr. Matematicheskoe modelirovanie gornyh obvalov i opolznei bol'shikh ob'emov. Inzhenernaja geologija, 1983, N 6.
2. Emel'janova E.D. Osnovnye zakonomernosti opolzneвого processa. - M.: Nedra, 1972
3. Drannikov A.M. Opolzni. Tipy, prichiny obrazovaniya, mery bor'by. Kiev, 1956.

4. Campbell C.S. Rapid granular flows. Annu. Rev. Flu Mech. 1990. V. 22. pp. 57-92.
5. Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P. The physics of Granular materials. Physics Today. 1996. V. 1.
6. Savage S.B., Hutter K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. J. Fluid Mech. 1999, pp.177-215.
7. Bogomolov S.V., Zaharov E.V., Zerkal' S.V. Matematicheskoe modelirovanie dvizhenija opolznja-potoka metodom chastic. MDOZMF-001. – Herson, 2001.
8. Harada, T., Koshizuka, S. and Kawaguchi, Y. Smoothed Particle Hydrodynamics on GPUs. In Proceedings of Computer Graphics International (June 2007, Petropolis Brazil)

Поступило в редакцию 19.09.2017
Received 19.09.2017