

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 539.374

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ
ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ****Мирзоева Кабира Адильовна***кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель кафедры Компьютерные
Науки Азербайджанского Государственного
Педагогического Университета***APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS IN STUDYING AND FORECASTING LANDSLIDE
PROCESSES****Mirzoeva Kabira Adil***candidate of physical and mathematical sciences,
Senior Lecturer, Computer Department
Science of Azerbaijan State
Pedagogical University*

Аннотация. Представленная работа относится одним из направлений научно-исследовательских работ и заключается к разработке и использованию математических моделей для определения и прогноза напряженно-деформированного состояния горных пород, описываемых различными механическими моделями, наиболее полно отражающих специфику горно-геологических условий, а также результатов инструментальных наблюдений за деформированием земной поверхности. Применение уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости к селям и оползням требует введения дополнительных форм зависимости касательных напряжений τ от скорости v . При учете реологических особенностей исследуемой среды используется наиболее распространена формула Кулона и Вельми.

Summary The presented work belongs to one of the areas of scientific research and consists in the development and use of mathematical models for determining and predicting the stress-strain state of rocks described by various mechanical models that most fully reflect the specificity of geological conditions, as well as the results of instrumental observations of deformation Earth's surface.

The application of the equations of motion of a viscous incompressible fluid to mudflows and landslides requires the introduction of additional forms of the dependence of the tangential stresses τ on the velocity v . When taking into account the rheological features of the studied medium, the most common formula of Coulomb and Velmí is used.

Ключевые слова: механическая модель, математическое описание, горные породы, оползень, обвал, предупреждение начало процесса.

Key words: mechanical model, mathematical description, rocks, landslide, collapse, warning the beginning of the process

Среди катастроф природного характера оползни стоят на четвертом месте после засух, наводнений и землетрясений. Оползень - это смещение части горных пород на более низкий гипсометрический уровень при сохранении контакта с неподвижным основанием. Оползневые процессы - это последовательные изменения состава, состояния и свойств оползня с момента его зарождения и перемещения на другой уровень вплоть до полного затухания, проявляющиеся в деформациях слагающих оползень горных пород. Ликвидация оползней — длительный процесс, который занимает в среднем от 6 до 10 месяцев. Опыт показывает, что предупреждать оползни, например, на автодорогах значительно дешевле, чем ликвидировать последствия их активизации, ведь это приводит не только к многократному увеличению расходов на строительные работы, но и к потерям в экономике в результате ограничения

движения транспорта и т.д. Более половины всего материального ущерба, причиняемого оползнями, связано с ошибками или допущенными при расчетах устойчивости склонов и проектировании противооползневых сооружений. Основным количественным показателем устойчивости склонов является коэффициент запаса устойчивости, показывающий отношение удерживающих и смещающих сил действующих на участок склона. В случае если смещающие силы больше, склон считается неустойчивым, образуется оползень.

Для анализа динамики селей, обвалов и оползней используется значительное количество математических моделей [1-6]. Для оценки их применимости к конкретному процессу, а также для разработки новых моделей необходимо провести анализ и типизацию уже существующих. Классификация и примеры математических

моделей селевых и склоновых процессов, а также схемы представления потока вещества для различных типов моделей детально анализировано в [1]. Изучение склоновых процессов, особенно таких катастрофических проявлений, как обвалы, оползни и сели, необходимо для их прогноза и проектирования защитных сооружений. При этом важной составляющей является определение масштабов и динамических характеристик этих процессов и явлений, для чего применяются различные методы: полевые наблюдения, дистанционные методы, экспериментальное и математическое моделирование (у каждого из них — своя область применения и своя степень точности).

Использование математического моделирования позволяет детально количественно охарактеризовать тот или иной опасный процесс, что необходимо для его последующего количественного прогноза и управления им. Этот метод в настоящее время активно развивается и имеет большие перспективы.

В работе [2] проанализированы методы расчета относительных весов опасности территории, который показал, что наиболее приемлемым для определения относительной опасности территории является метод попарных сравнений. В работе [3] предложен подход к синтезу экспертных систем, которые позволяют оценивать вероятность возникновения элементарных нежеланных (базисных) событий на потенциально опасных объектах. Исследование оползневых процессов является актуальной темой, как при строительстве новых объектов, так и при эксплуатации уже возведенных. Систематическое наблюдение за оползнями позволяет предотвратить разрушение откосов (как естественных, так и искусственных), склонов, не допустить угрозы аварийных ситуаций в зданиях и сооружениях, а значит избежать человеческих жертв.

Актуальность темы для города Шеки обусловлена наличием множества территорий, подверженных оползневому процессам. Оценка устойчивости естественных склонов и искусственных откосов является одной из главных задач инженерно-геологических изысканий практически для всех видов строительства. Но, ни одна отрасль инженерной деятельности не зависит так тесно от устойчивости склонов и откосов искусственных выемок как строительство автомобильных и железных дорог.

Разработка надежных противооползневых сооружений — весьма сложная задача, успешное решение которой невозможно без количественной оценки устойчивости склонов и развития склоновых деформаций, основанной на комплексе математических моделей, описывающих различные стадии оползневого процесса. Однако, несмотря на то, что начало работ по исследованию оползней приходится на шестидесятые годы прошлого века, получение такой оценки связано с большими трудностями — сложность и многофакторность оползневых явлений, обилие

переменных величин, определяющих ход оползневых процессов, отсутствие физически обоснованных зависимостей, дающих строгое математическое описание этих процессов. Так результаты расчетов устойчивости склонов, как правило, оказываются оптимистическими даже в тех случаях, когда имеется явная неустойчивость — живой оползень. Зачастую расчетные коэффициенты устойчивости превышали единицу, то есть показывали избыток устойчивости, в то время как должны были показывать равновесие удерживающих и сдвигающих сил — равняться единице. В то же время применять противооползневые мероприятия к любому склону экономически невыгодно, потому что при современном состоянии техники строительства стоимость противооползневых сооружений очень высокая и применение их экономически оправданно не везде и не всегда. Коэффициент запаса устойчивости определяется как отношение удерживающих и смещающих сил. Величина смещающих сил определяется через величину силы веса действующую на грунт, угла наклона поверхности склона. Величина силы веса, действующей на грунт, и угол наклона поверхности склона могут быть определены с достаточно большой точностью.

Массовая активизация оползней наблюдается при особых метеорологических условиях — выпадении большого количества осадков. Острота проблемы активизации оползней состоит в том, что катастрофические проявления их могут нести огромные экономические убытки.

Все факторы, обуславливающие формирование и развитие оползневых процессов делят на три группы:

- 1) постоянные или неизменяющиеся (геологическое строение и рельеф) территории окружающих региона;
- 2) медленно изменяющиеся (современные тектонические движения, климат, гидрогеологические, геофизиологические условия, растительность, почвы);
- 3) быстро изменяющиеся (метеорологические, гидрологические, сейсмические условия, хозяйственная деятельность).

Разделение оползней по их механизму проводится на одном иерархическом уровне, выделяется шесть отличных друг от друга типов оползней: скольжения, выдавливания, всплывания, течения, проседания и разжижения. Особенности инженерно-геологических условий территорий и, в первую очередь, состав, структура и свойства пород стратиграфо-генетических комплексов, слагающих склоны, обуславливают неравномерность как в целом на земном шаре, так и в отдельных геологических регионах, в частности, в специфических условиях территории, по особенностям техногенного воздействия на геологическую среду можно разделить на две орографические зоны: на севере — горная система Большого Кавказа, в южной части предгорная равнина.

Наиболее распространенными генетическими типами оползней на территории являются селевые и оползни-потоки, оползни скольжения и оползни разжижения. Оползни-потоки или оползни-сплывы по числу проявлений занимают первое место. Для них характерна тесная связь с корой выветривания пород [3].

В горно-складчатых областях территории оползни течения связаны с глинистыми элювиально-делювиальными и крупнообломочными покровными образованиями и рыхлыми оползневыми накоплениями.

Типичной особенностью механизма оползней течения является полная или частичная потеря первичной структуры пород в зоне смещения вследствие изменения влажности. Под воздействием гравитационных и гидродинамических сил происходит водно-пластическое течение глинистых пород.

Оползни скольжения связаны с различными по составу, возрасту и генезису скальными и полускальными породами. Для них характерно блоковое строение, наличие наклонной поверхности, совпадающей с плоскостями напластования, расщепленности, с крупными тектоническими разломами. Различия состава деформирующихся пород и их структуры предопределяют различия морфологии, морфометрии и динамики оползней этого типа. Оползни скольжения делятся на две разновидности: консеквентные - соскальзывающие, инсеквентные - срезающие.

Оползни разжижения распространены в областях молодых глинистых отложений мореного генезиса, характерным свойством которых является высокая чувствительность. Глины этой категории обладают способностью внезапного разжижения и перехода в текучее состояние или тиксотропностью.

Оползневые процессы оказывают существенное влияние на общее экологическое состояние территории и ежегодно наносят значительный материальный ущерб жителям республики, а иногда приводят к человеческим жертвам. Однако человек в ходе хозяйственной деятельности может изменить - ускорить или замедлить - ход развития геологических процессов. Нарушение склонов при строительстве жилых домов и других различных сооружений на некоторых районах территории республики приводит к образованию и активизации оползней.

Сложность и многообразие форм рельефа массивов горных пород и межгорных впадин, его сейсмотектоническая активность, анизотропия и неоднородность свойств и строения, бассейн горной реки Киш, влияние наземных и подземных инженерных сооружений, интенсивно и хаотически расширяющаяся сеть туристических объектов и другие геомеханические факторы предопределяют нестационарность напряжений, деформаций и смещений пород. По этой причине становится весьма актуальной оценка количественных и качественных показателей распределения этих

полей массивов пород с горным рельефом, которое напрямую зависит от вопросов геомеханики, связанных с расчетом и прогнозом напряженно-деформированного состояния горных массивов, определением параметров процесса сдвижения и охраной сооружений от подработки. Актуальность данных проблем обусловлена многочисленными случаями опасных геомеханических и геодинамических явлений, прошедших в районе Шеки и близлежащих территориях.

Интенсивные техногенные смещения земной поверхности (более 1-2 метров) – менее распространенное явление, но с весьма опасными последствиями. Основные и наиболее опасные формы этих последствий – сильные деформации наземных сооружений, разрыв коммуникаций, слом обсадных колонн эксплуатационных скважин, заболачивание и затопление опускающихся участков земной поверхности, региональное проявление оползневых процессов.

Одним из направлений научно-исследовательских работ заключается в разработке и использовании математических моделей для определения и прогноза напряженно-деформированного состояния горных пород, описываемых различными механическими моделями, наиболее полно отражающих специфику горно-геологических условий, а также результатов инструментальных наблюдений за деформированием земной поверхности.

Изменение коэффициента пористости при нагрузке и разгрузке для большинства пористых пород можно представить в виде линейной функции от логарифма гидростатического напряжения σ :

$$e = N - \lambda \cdot \ln \sigma; e = e_k - k \cdot \ln \sigma, \quad (1)$$

где λ , k – углы наклона прямых соответственно при нагрузке и разгрузке; N , e_k – начальные значения коэффициента пористости. При этом деформирование образца при разгрузке и повторной нагрузке считается упругим. Объемные пластические деформации сжатия будут возникать при выходе напряжений за границу поверхности текучести A_{pc} , которая имеет вид эллипса со смещенным относительно начала координат центром. Согласно ассоциированного закона пластического течения поверхность текучести одновременно является также поверхностью пластического потенциала, т.е.

$$F = Q = \frac{q^2}{M^2 \cdot \sigma} + \sigma - p_c = 0, \quad (2)$$

где F , Q обозначают соответственно критерий разрушения и пластический потенциал; M – параметр линии критического состояния (CSL) вида $q = M \cdot \sigma$.

Появление объемных пластических деформаций ϵ_v^p означает упрочнение материала, т.е. расширение области упругости A_{pc} по закону

$$p_c = p_{c0} \cdot \exp\left(\frac{1+\varepsilon_0}{\lambda-k} \cdot \varepsilon_v^p\right). \quad (3)$$

В области низких нормальных напряжений (при $\sigma < p_c/2$) упрочнение материала невозможно и появление пластических деформаций связано с разрушением материала при сдвиге или при растяжении. В диаграмме σ - q форма критерия разрушения от сдвига аналогична критерию Кулона-Мора:

$$F = q - \sigma \cdot \tan \phi * - C *, \quad (4)$$

$$\text{где } \tan \phi * = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi}; C * = p_c \cdot (M - \tan \phi *) / 2.$$

При растяжении критерий разрушения записывают в виде

$$F = -\sigma_3 - \sigma_p = 0,$$

где σ_p – прочность на растяжение.

При разрушении материала от сдвига или растяжения появляются пластические деформации увеличения объема (дилатансии). При этом параметр p_c согласно (3) уменьшается и вместе с ним упругая область, т.е. происходит разупрочнение. Однако следует отметить, что специфика деформирования коллекторов при падении пластового давления в обычных условиях не создает условий для разрушения от сдвига или растяжения.

Чаще всего подвижка земляных масс на склонах происходит вследствие сочетания ряда причин. В зависимости от конкретных условий и причин подвижки пород на склонах имеют различную динамику и разные формы проявления: они могут быть поверхностными или глубокими. К поверхностным относятся смещения дернового покрова и маломощного делювия; среди них различают: сплывы, оплывины и осывы. Все они образуются в результате насыщения и разжижения пород во-дой, действуют обычно периодически и имеют малую скорость движения.

Глубокие смещения, или собственно оползни, захватывают склон на глубину, иногда измеряемую десятками метров. Динамика оползневого процесса в данном случае зависит не только от причин развития оползней, но и от геологического строения склона (состава пород, условий их залегания, слоистости и т.д.).

Классификация оползней предусматривает выделение собственно оползней, а также их разновидностей в виде сплывов (или сплывин) и оползней - обвалов. Собственно оползни происходят только путем скольжения земляных масс по склону. Плоскость скольжения обычно располагается на значительных глубинах (многие метры). Сплывы - смещение земляных масс на небольшой площади (сотни квадратных метров) вследствие водонасыщения верхних слоев. Глубина залегания плоскости скольжения до 1 м. Свойственны весеннему периоду года. Оползни-обвалы представляют собой смещение земляных масс одновременно по типу скольжения и обвала. Типичны для крутых склонов.

Учитывая, что в каждом регионе грунты имеют свои генетические особенности, предпочтительнее при прогнозировании применять механико-математические расчеты устойчивости склонов и искусственных откосов в нескальных породах

Изучение склоновых процессов, особенно таких их катастрофических проявлений, как обвалы, оползни и сели, необходимо для их прогноза и проектирования защитных сооружений. При этом важной составляющей является определение масштабов и динамических характеристик этих процессов и явлений, для чего применяются различные методы: полевые наблюдения, дистанционные методы, экспериментальное и математическое моделирование (у каждого из них — своя область применения и своя степень точности). Использование математического моделирования позволяет детально количественно охарактеризовать тот или иной опасный процесс, что необходимо для его последующего количественного прогноза и управления им. Этот метод в настоящее время активно развивается и имеет большие перспективы.

Система уравнений движения Навье — Стокса по-лучается при рассмотрении суммы сил, действующих на элементарный бесконечно малый объем жид-кости $dx \cdot dy \cdot dz$ в форме параллелепипеда, где dx , dy и dz — стороны параллелепипеда в направлении соответственно осей координат x , y и z (или соответственно x_1 , x_2 и x_3). Как известно, на единицу площади стенки данного объема в направлении оси i действуют нормальные σ_i (действующие на площадку, перпендикулярную оси i) и касательные напряжения τ_{ij} (действующие на площадку, перпендикулярную оси j , $j \neq i$) и τ_{ik} (действующие на площадку, перпендикулярную оси k , $k \neq i$, $k \neq j$). На единицу массы данного объема также действует гравитационная си-ла g_i в проекции на ось i . После сложения сил и при-менения второго закона Ньютона, а также сокращения обеих частей уравнения на $\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz$ получим формулу для проекции скорости v_i и напряжений σ_i , τ_{ij} , τ_{ik} на ось i :

$$\frac{dv_i}{dt} = g_i + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} \right), \quad (5)$$

где t — время; ρ — плотность жидкости; x_i , x_j , x_k — координаты положения объема соответственно по осям i , j , k .

Если учесть, что по формуле Ньютона

$$\sigma_i = -p + 2\eta \frac{\partial \sigma_i}{\partial x_i}, \quad (6)$$

то мы получим систему уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости Навье — Стокса, лежащую в основе всех математических моделей рассматриваемого типа. Форма указанных уравнений, интегрированная по глубине, носит

название уравнений Сен-Венана.

Применение уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости к селям и оползням требует введения дополнительных форм зависимости касательных напряжений τ от скорости v , отличных от выражения (3). В частности, наиболее распространена реологическая формула Кулона и Вельми:

$$\tau = \rho g H \left(\cos \alpha + \frac{v^2}{gR} \right) (1 - r_u) \operatorname{tg} \phi + \rho g \frac{v^2}{\xi}, \quad (7)$$

где g — гравитационная сила; H — глубина потока; α

— угол наклона склона; R — радиус кривизны ложа потока в вертикальном продольном сечении; r_u — коэффициент порового давления грунта; ϕ — угол трения; ξ — коэффициент турбулентности.

Для моделей рассматриваемого типа необходимы: цифровая модель рельефа, заданные начальные и граничные условия (такие характеристики потока, как скорость и давление) и сведения об изменениях этих характеристик с течением времени. Необходимы также данные о физических свойствах вещества потока — плотности, вязкости, угле трения, модуле упругости. В результате работы моделей получают поля значений физических параметров потока вещества в различные моменты времени — векторы скорости, глубина, давление, силы и др. Указанные значения представляются в виде карт или цифровых моделей. Получаемая в

результате моделирования информация может быть полезной при рассмотрении зон распространения селей и оползней-потоков, а также при проведении защитных мероприятий.

Следует отметить, что производная от компоненты скорости по времени (см. левую часть уравнения (1), может быть представлена по Лагранжу или по Эйлеру.

Литература

1. Михайлов В.О. Классификация численных математических моделей селевых и склоновых процессов. Инженерная геология, Сентябрь 2011г.
2. Эглит М.Э. Неустановившиеся движения в руслах и на склонах. М.: Изд-во МГУ, 1986, 96 с.
3. Трофимов А.М., Московкин В.М. Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: Изд-во Казан. университета, 1983. 218 с.
4. Штернлихт Д.В. Гидравлика. М.: КолосС, 2008. 656 с.
5. Михайлов В.О. Трехмерная математическая модель обвальных процессов // Вестник МГУ. Серия 5. География. 2011. № 4. С. 53–58.
6. Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Гидравлические уравнения связанных селевых потоков и их некоторые частные решения // Труды Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Пятигорск, Россия, 22–29 сентября 2008 г. Изд-во Института Севкавгипроводхоз, 2008. С. 245–248.