

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ

CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF LANDSLIDE SLOPE STABILITY CALCULATIONS

УШАКОВ А.С.

Аспирант кафедры инженерной геологии Российского государственного геолого-разведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ), геолог ОАО «Фундаментпроект», ushakovi@inbox.ru

USHAKOV A.S.

Postgraduate student of the engineering geology department of the Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI-RGGRU), geologist of the «Fundamentproekt» OJSC, ushakovi@inbox.ru

Ключевые слова:

оползень; оползневый процесс; устойчивость склона; методы расчета; механизмы движения; идентификационные признаки; метод круглоцилиндрической поверхности скольжения; метод конечных элементов; классификация.

Key words:

landslide; landslide processes; slope stability; calculation methods; mechanisms of movement; identification characteristics; method of circular cylindrical sliding surface; finite element method; classification.

Аннотация

В статье рассматривается современное состояние проблемы расчетов устойчивости оползневых склонов, проводится сравнительный анализ различных определений и классификаций оползней, излагаются основные механизмы их скольжения, приводится классификация используемых в современной практике методов расчета устойчивости склонов с более подробным рассмотрением некоторых из них.

Введение

При строительстве на склонах нередко приходится прибегать к расчетам их устойчивости. Ведь учет таких приводящих к их разрушению процессов, как оползание пород, суффозионный вынос и др., может привести к деформациям возведенных зданий и сооружений и существенному материальному ущербу, а также нанести вред жизни и здоровью людей. Поэтому при застройке склона необходим точный расчет коэффициента запаса его устойчивости, который позволит разработать мероприятия по обеспечению надежной эксплуатации проектируемых объектов.

Существует большое количество типов оползней и механизмов их движения и, соответственно, множество их идентификационных признаков и классификаций, которые необходимо точно представлять себе для точной, правильной и эффективной оценки смещения грунта и надлежащего выбора метода расчета устойчивости склона.

Abstract

The article discusses the current state of the problem of landslide slope stability calculations, carries out comparative analysis of various definitions and classifications of landslides, puts down the main mechanisms of their sliding, presents a classification of slope stability calculation methods used in the modern practice with a more detailed consideration of some of them.

Классификация оползней

Определений понятий «оползень» и «оползневый процесс» достаточно много. Наиболее часто употребляемые из них приведены в табл. 1. Анализируя эту таблицу, можно отметить, что не все авторы (Н.В. Коломенский, И.С. Комарова, К. Терцаги) разделяют термины «оползень» и «оползневый процесс». Такая ситуация нередко проявляется и в современной практике. К тому же в некоторых определениях фигурирует словосочетание «масса грунтов», что, по мнению автора, тоже не совсем корректно.

Наиболее четкое разделение указанных терминов, а также полные и всеобъемлющие определения соответствующих понятий дал В.В. Кюнтцель в 1980 году, поэтому далее в статье будем опираться именно на них.

Оползни — вторичные экзогенные геологические процессы. Они могут возникать в результате выветривания, подмыва, землетрясений, хозяйственной дея-



тельности человека и др. Распространение оползней тесно связано с геоморфологическими условиями территории и литологическим составом слагающих склоны пород.

В качестве идентификационных признаков проявлений оползневых процессов часто используют:

- оползневые трещины, которые в начальной стадии формирования оползня едва заметны, но по мере развития процесса постепенно расширяются, удлиняются и, соединяясь друг с другом, создают сплошную линию отчленения оползневого тела;
- оползневые цирки, представляющие собой выемки, образующиеся в склоне в результате оползания части грунтового массива;
- плоскости срыва, формирующиеся при отрыве массы оползающих пород;
- валы, образующиеся у подножия склона в результате клиновидного выпора пород под давлением оползающей массы;
- оползневые уступы — площадки, наклоненные обычно в сторону склона и образующиеся в результате скольжения оползневого тела по криволинейной поверхности;
- заболоченные участки с развитием болотной растительности в тыловой части уступа оползня, образующиеся за счет скопления атмосферных осадков в углублениях уступов;
- «пьяный лес» — искривленные деревья, произрастающие на оползневом склоне и принимающие наклонное положение в результате смещений грунта;
- взбугренные поверхности, образующиеся в результате эрозионного сглаживания оползневых уступов

и последующего формирования эрозионных форм рельефа;

- несовпадение положений пластов в разрезе склона и изменения азимутов их простираения;
- большое количество водопроявлений на склонах;
- наличие деформаций сооружений, расположенных в зоне влияния оползневого процесса [1].

Одна из первых классификаций оползней была предложена Ф.П. Саваренским. Он разделил оползни на три группы [10]:

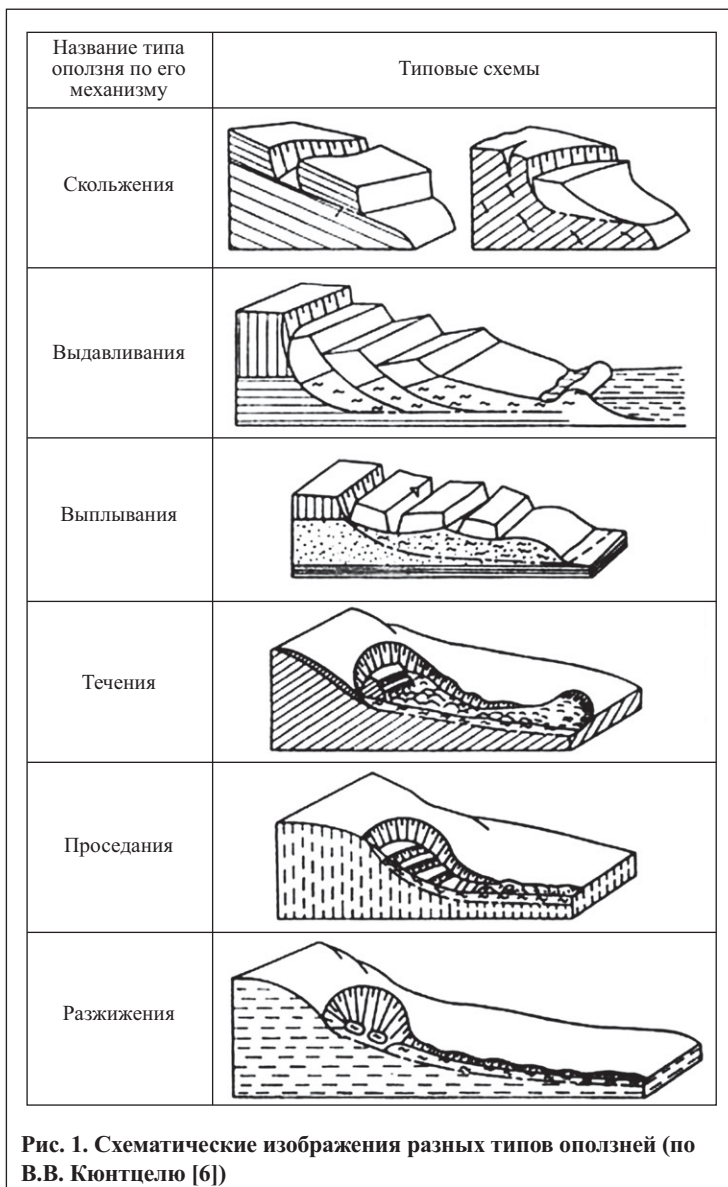
- *асеквентные* — перемещающиеся по цилиндрическим поверхностям скольжения в однородных неслоистых подстилающих породах;
- *консеквентные* — перемещающиеся по имеющимся поверхностям с падением в сторону откоса;
- *инсеквентные* — перемещающиеся по поверхностям скольжения, частично (в основном в верхних зонах) проходящим поперек геологических структур.

По какому основному признаку правильно классифицировать оползни? Его, на взгляд автора, следует выбирать в зависимости от преследуемых целей. Если цели скорее практические, чем теоретические, целесообразно разделять механизмы оползневых процессов.

Под механизмом оползневого процесса понимается закономерная последовательность взаимодействия отдельных частей оползня под влиянием внешних причин в различных инженерно-геологических условиях. Современные представления о механизмах оползания лежат в основе большого количества классификаций. Их сопоставление приведено в табл. 2. Как видно из этой таблицы, все классификации развивались вместе с развитием науки и математического аппарата и, не-

Таблица 1

Определения понятий «оползень» и «оползневый процесс»			
Авторы	Год опубл.	Оползень	Оползневый процесс
В.Д. Ломтадзе	1977	Масса горных пород, сползших или сползающих вниз по склону или откосу под влиянием силы тяжести, гидродинамического давления, сейсмических и некоторых других сил	Геологический процесс, проявляющийся в вертикальном и горизонтальном смещении масс горных пород вследствие нарушения их устойчивости — равновесия
Н.В. Коломенский, И.С. Комаров	1964	Оползнями называют движение масс по склону под действием силы тяжести, связанное во многих случаях с деятельностью поверхностных и подземных вод	-
Е.М. Пашкин, А.А. Каган, Н.Ф. Кривоногова	2011	Масса грунтов, сползших или сползающих по откосу или склону	Процесс смещения масс грунта по откосу или склону вследствие естественного или искусственного удаления грунта из нижней части склона, ослабления прочности грунтов, действия гидродинамического давления подземных вод, действия сейсмических сил и др.
К. Терцаги	1932	Медленное, а также быстро развивающееся движение земляных масс на естественных склонах и откосах искусственных выемок, происходящее вследствие изменения действующих сил или изменения баланса сопротивлений	-
В.В. Кюнтцель	1980	Часть геологической среды, ограниченная земной поверхностью и поверхностью смещения, по которой без потери контакта с неподвижным основанием происходит ее перемещение на новый, как правило, более низкий гипсометрический уровень	Последовательные изменения состава, состояния и свойств оползня с момента его зарождения и перемещения на другой уровень вплоть до полного затухания, проявляющиеся в деформациях слагающих его горных пород
Е.П. Емельянова	1972	Смещение на более низкий уровень части горных пород, слагающих склон, в виде скользящего движения, в основном без потери контакта между движущимися и неподвижными породами	-



смотря на различия в количестве выделяемых в них типов оползней и их наименованиях, во многом сходны. Но наиболее полной, точной и обобщающей с практической точки зрения является классификация

В.В. Кюнтцеля. Поэтому в дальнейшем за основу будет взята именно она. Рассмотрим ее более подробно.

В.В. Кюнтцель [6] разделил оползни на две группы. Практически все оползни *группы I* относятся к категории глубоких. В основном это крупные оползни, отличающиеся блоковой структурой, отчетливо выраженной поверхностью скольжения (зоной смещения) фронтальной или циркообразной формой. Для всей группы характерна определенная последовательность развития, различающаяся для разных типов оползней в деталях. Встречаются оползни, имеющие как значительные скорости движения, так и очень небольшие, причем последние в количественном отношении преобладают [6].

Основные типы оползней представлены на рис. 1. Первые три из показанных типов (оползни скольжения, выдавливания, выплывания) относятся к группе I. Рассмотрим их подробнее.

Оползни скольжения являются одними из самых распространенных в природе. Они локализируются в пределах горно-складчатых областей. В платформенных условиях оползни скольжения встречаются очень редко — обычно в связи с какими-либо аномалиями геологического строения, например с наличием зоны разлома, древней коры выветривания или других зон ослабления.

Разнообразие состава деформирующихся пород и структуры горных склонов определяет различия в формах проявления оползней этого типа. В то же время их объединяет одинаковый характер деформирования склонов, проявляющийся в виде скольжения блоков пород, иногда сильно раздробленных в процессе движения, по единой поверхности смещения, часто совпадающей с плоскостями напластования, расщеливанности пород или с тектоническими нарушениями.

В общих чертах механизм развития оползня скольжения представляется следующим образом. Возникновению первичного оползня обычно предшествует длительный процесс формирования склона, в течение которого изменяется его конфигурация, а следовательно, возрастают основные характеристики поля напряжений. Также изменяются состав, состояние и свой-

Таблица 2

Сопоставление существующих классификаций оползней по механизмам их развития [1]						
Авторы, год опубл.	Д. Варнес, 1958	М.К. Рзаева, 1969	Г.С. Золотарев, 1970	К.А. Гулакян, В.В. Кюнтцель, 1970	Д. Варнес, 1978	В.В. Кюнтцель, 1980
Типы оползней	скольжения	блоковые, срезающие	-	скольжения	скольжения	скольжения
		соскальзывания	соскальзывания (консеквентные)			
		сползания	-			
		выдавливания (одесского типа)	выдавливания (детрузивные)	выдавливания	выдавливания	выдавливания (сдвига)
		суффозионные, выплывания	выплывания	выплывания	-	выплывания
	течения		суффозионные			
просадочные		потоки и сплывы	проседания	течения	проседания	
потоки (течения, оползания)			течения		течения (потоки)	
сплывы, оплывины						
	норвежского типа	разжижения	разжижения	-	разжижения	



ства слагающих склон пород. Под воздействием собственного веса пород в отдельных частях склона образуются зоны, в которых развиваются деформации хрупкого разрушения или медленной ползучести. Последовательное преодоление максимального (пикового) сопротивления пород сдвигу в отдельных точках склона вызывает возникновение дополнительных напряжений в соседних точках, что в конечном счете приводит к прогрессирующему разрушению в зоне смещения [15].

Наличие в породах плоскостей напластования, различного рода трещин, разломов и других зон ослабления, которые в горно-складчатых областях имеют наклонное залегание, ведет к значительному ускорению оползневых деформаций [6].

Висячие оползни обычно переходят в обвалы с резким ускорением движения и частичной или полной дезинтеграцией блоков. При многослойном залегании пород и падении слоев в сторону склона образуются консеквентные оползни. В том случае, когда поверхности смещения секут слои пород, часто совпадая с различными зонами ослабления, возникают инсеквентные оползни [10].

Оползни скольжения приурочены в основном к горным районам, где присутствуют тектонические нарушения, зоны ослабления, толщи напластования. Блоки пород как бы скользят по единой поверхности смещения. Огромные по мощности и массе толщи пород создают колоссальное давление, вследствие чего возникают зоны деформации, а растущее напряжение в отдельных точках приводит к разрушению пород в зоне смещения.

Оползни выдавливания (сдвига) преобладают в европейской части России. Механизм их развития несколько сложнее, чем у оползней скольжения. Они возникают в горизонтально залегающих многослойных литолого-стратиграфических комплексах пород, в пределах которых четко выделяются основные деформирующиеся горизонты (ОДГ). Состав, состояние и свойства пород ОДГ в значительной степени определяют особенности механизма и динамики оползневого процесса, что позволяет по этим признакам характеризовать оползни данного типа. Однако наряду с отмеченными особенностями оползни сдвига обладают рядом общих черт, объединяющих их в одну категорию [6].

Механизм развития оползня сдвига в настоящее время представляется следующим образом. Под воздействием некоторой совокупности естественных и антропогенных факторов, среди которых особое место занимают размыв основания склона и изменение общей увлажненности пород, происходят направленные изменения напряженного состояния откоса. В результате этого склон постепенно достигает состояния предельного равновесия. При этом рост касательных напряжений в наиболее ослабленных его частях, каковыми являются ОДГ, вызывает увеличение в них деформации, что в конечном итоге приводит к нарушениям устойчивости всего оползневого склона [2]. Характер этих деформаций в основном зависит от состава и свойств пород ОДГ, а также от величины и скорости изменения напряженного состояния. На определенном этапе развития процесса по трещине закола в коренном склоне происходит отчленение блока пород, резко ускоряющее деформирование всего оползневого склона [6].

В пределах склонов, на которых развиваются оползни, выделяются три зоны, различающиеся по характеру протекающих деформаций. Первая зона (растяжения или опускания) занимает верхнюю часть. Она характеризуется постепенным отделением от коренного массива блока пород, опускающегося по сравнительно крутой трещине отрыва (растяжения). Во второй зоне (перемещения, или транзита) заметно преобладают горизонтальные составляющие векторов смещения, направления которых по всей зоне практически одинаковы, а величины уменьшаются от центра зоны к периферии. Третья зона (сжатия, или поднятия) охватывает полосу подножия склона и отдельные участки перед ним. В пределах этой зоны возрастают вертикальные составляющие векторов смещений, направленные вверх [4]. Образование зоны сжатия связано с сопротивлением еще не захваченных деформациями пород движению оползающего массива. Вследствие глубокого залегания поверхности смещения (которая не выходит на земную поверхность) образуется вал сжатия (выпирания), препятствующий дальнейшему продвижению оползня [7].

Оползни выплывания на территории европейской части РФ почти не описаны. Это объясняется, по-видимому, сравнительно редким их возникновением и отсутствием ярко выраженных следов их проявлений. Поэтому отдельные участки с проявлениями этих оползней остаются неразведанными, свойства связанных с их возникновением ОДГ специально не исследуются, отсутствуют какие-либо режимные наблюдения за изменениями уровней подземных вод.

В качестве ОДГ здесь обычно выступают однородные горизонтально залегающие тонкозернистые сильнообводненные пески. Возрастание при определенных условиях гидравлического градиента и связанного с ним гидродинамического давления до некоторых пороговых значений может в ряде случаев вызывать быстрое выплывание песков и, как следствие, деформации всей перекрывающей толщи [3].

Начало этого процесса, как правило, связано с размывом склона рекой, озером, морем или водохранилищем и уничтожением ранее смещенных блоков пород, экранирующих выплывающий слой. Тот же эффект может быть достигнут при вскрытии пльвунных пород искусственными выемками [3].

Текучесть песков распространяется от выхода их слоя на поверхность земли в сторону, противоположную их движению, и обычно охватывает узкую рукавообразную полосу. Такое развитие подземного потока связано со значительным увеличением пористости пород, что возможно лишь после их частичного выноса. Под влиянием суффозии ОДГ начинает разрушаться и вся вышележащая толща пород. На поверхности склона возникают многочисленные трещины, разбивающие массив на блоки, с последующим оседанием пород, движением их в сторону выпора и запрокидыванием. Оседающая поверхность в головной части оползня иногда приобретает типичную форму оползневого грабена, однако возможны и другие формы [12].

Последние три типа оползней, схематически изображенных на рис. 1 (течения, проседания, разжижения), относятся к *группе II*. Большая их часть может быть отнесена к категории поверхностных. Однако сре-

ди них встречаются оползни, во многом сходные по облику и механизму с представителями группы I.

Оползни группы II по сравнению с группой I обычно меньше по размерам, но значительно больше по распространенности и частоте проявлений. По существу, некоторые из них (оползни-потоки) имеют повсеместное распространение на территории европейской части России и 1–3-летние циклы развития.

Рассмотрим подробнее оползни этой группы.

Оползни течения (оползни-потоки) — одни из наиболее распространенных как в европейской части РФ, так и на всем земном шаре. Как правило, они отличаются небольшими размерами. Развиваются эти оползни в элювиально-делювиальных глинистых или крупнообломочных породах, чехлом покрывающих склоны гор, морских побережий, речных долин и оврагов. Нередко они возникают в рыхлых оползневых накоплениях и тогда часто называются оплывинами или сплывами [6].

Для многих оползней данного типа, особенно для наиболее крупных из них, характерна глетчеровидная форма. Это связано с особенностями накопления поверхностных отложений на склонах, избирательным выветриванием горных пород, неровностями коренного ложа, гидрогеологическими условиями, а также свойством оползающих рыхлых масс выработать углубления в породах подстилающей толщи, даже если последние обладают сравнительно высокой степенью уплотнения и литификации [6].

Возникновение оползней-потоков чаще всего обусловлено полной или частичной потерей первичной структуры глинистых пород вследствие значительно-го повышения их влажности. Под действием гравитационных, а в ряде случаев и гидродинамических сил происходит смещение материала по заранее подготовленной или сформировавшейся поверхности, которое сопровождается его вязкопластическим течением. Оползни-потоки с различными скоростями движутся вниз по склону обычно до тех пор, пока оползающие массы не достигнут более пологих его участков или не встретят естественную или искусственную преграду [6].

Особенности механизмов развития *оползней проседания* во многом определяются деформационным поведением лёссовых пород. Под влиянием инфильтрации атмосферных осадков возникают просадочные явления в верхней, наиболее пористой, части лёссовой толщи, а главным фактором просадочности ее нижней части является выклинивание подземных вод на склоне. Вследствие неравномерных просадок на поверхности склона возникают трещины, облегчающие проникновение атмосферных осадков вглубь склона и способствующие распространению просадочных деформаций в более глубокие слои лёссовой толщи.

В лёссах возникают зоны повышенной влажности, часто совпадающие с областями их контактов с коренными породами. При быстром смачивании лёссов их прочность может снижаться в несколько раз. В определенный момент происходит отчленение оползневого массива от остальной части склона вследствие «лавиного» разрушения структуры сильно увлажненных пород. Смещающиеся в виде отдельных блоков породы в процессе движения обычно теряют свою первичную

структуру и переходят в земляные потоки, быстро движущиеся по траектории, близкой к прямолинейной [8].

Оползни разжижения распространены в областях развития молодых глинистых отложений морского происхождения. Характерным свойством этих отложений является их высокая чувствительность к разрушению структуры, во много раз превышающая таковую для нормальных глин. Это происходит из-за снижения концентрации солей в поровом растворе, приводящего к снижению пределов текучести и пластичности. При нарушении структуры эти глины обладают способностью внезапно разжижаться и переходить в текучее состояние [6].

Оползни разжижения возникают внезапно, часто без видимых внешних причин. Этот процесс обычно начинается с образования в нижней части склона небольшого оползня. Затем начинают деформироваться прилегающие к нему части склона, в результате чего возникает округлая депрессия диаметром иногда до нескольких сотен метров. В ходе развития оползня резко изменяется состояние плывунных глин, которые разжижаются, вытекают через суженную горловину депрессии и с большой скоростью движутся по ложбине к ближайшему водотоку, а затем далее по его долине. Процесс завершается почти полным удалением разжиженных глинистых масс из оползневой депрессии и остановкой грязевого потока [6].

Из обеих рассмотренных групп наиболее распространены оползни скольжения, выдавливания и течения. Поэтому ниже им будет уделено наибольшее внимание.

Классификация методов расчета оползневых склонов

Оценка устойчивости оползневых склонов — одна из важнейших и сложнейших задач геотехнических исследований. В ее решение большой вклад внесла и отечественная инженерная геология. Однако в последние десятилетия данное направление развивалось мало.

В качестве базиса для классификации методов расчета устойчивости склонов может лежать одна из двух предельных схем [14].

1. Идея *предельной схемы прочностных характеристик* состоит в нахождении таких критических значений параметров прочности грунта, при которых расчетный склон перешел бы в состояние предельного равновесия. Соответственно, коэффициент устойчивости при таком подходе определяется как отношение фактического значения прочностной характеристики к ее критическому значению.

2. Идея *предельной схемы удерживающих и сдвигающих усилий* заключается в изучении соотношений сдвигающих и удерживающих усилий, действующих на склон. Коэффициент устойчивости в этом случае может быть определен как отношение удерживающего момента к сдвигающему или удерживающей силы к сдвигающей [13].

Принципиальная схема классификации методов расчета устойчивости склонов, основанная на механико-математическом подходе, представлена на рис. 2. Группы методов численного моделирования устойчивости склонов, которые постоянно развиваются и совершен-



ствуются в связи с их интенсивным использованием (например, основанные на анализе предельного равновесия и на законах механики сплошной среды), показывают достаточно хорошую сходимость получаемых результатов [13].

Примеры методов расчета устойчивости склонов

Рассмотрим более подробно некоторые из методов расчета устойчивости склонов, результаты использования которых дают неплохую сходимость.

Одним из наиболее популярных в строительной практике является *метод круглоцилиндрической поверхности скольжения* (существует большое количество его разновидностей — методы Бишопа, Фелле-ниуса, «Корпуса инженеров № 1» и др.). Его целесообразно применять, когда откос сложен однородными грунтами. Данный метод предполагает, что сползание грунта может произойти лишь в результате вращения оползающего массива вокруг центра O (рис. 3). Следовательно, в разрезе поверхность скольжения BB будет представлена дугой окружности радиусом r с центром в точке O . Оползающий массив при этом рассматривается как некоторый твердый блок, всеми своими точками участвующий в одном общем движении [9]. Он находится под действием двух моментов — вращающего ($M_{вр}$) и удерживающего ($M_{уд}$) массив. Их отношение представляет собой коэффициент устойчивости склона K_y . Вращающий момент определяется умноже-

нием значения сдвигающей силы на длину плеча от центра вращения O , а удерживающий момент — умножением силы сопротивления сдвигу на аналогичное плечо. При этом, т.к. угол наклона касательной к поверхности скольжения и вес отдельных частей массива непостоянны, приходится расчленять воображаемый оползневой массив (сползающий блок) на n расчетных отсеков и для каждого из них определять силы сопротивления сдвигу и сдвигающие силы. Тогда коэффициент запаса устойчивости склона K_y находится как отношение сумм тех и других моментов:

$$K_y = \frac{\sum M_{уд}}{\sum M_{вр}} \quad (1)$$

Поскольку грунтовые воды оказывают взвешивающее влияние на породы и фильтрационное (гидродинамическое) давление на весь массив, окончательный вид формул для определения коэффициента устойчивости будет следующим:

при отсутствии грунтовых вод:

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \cdot \cos \alpha_i \cdot tg \phi_i + c_i \cdot l_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \cdot \sin \alpha_i + F_{ci})} \quad (2)$$

при простом затоплении:

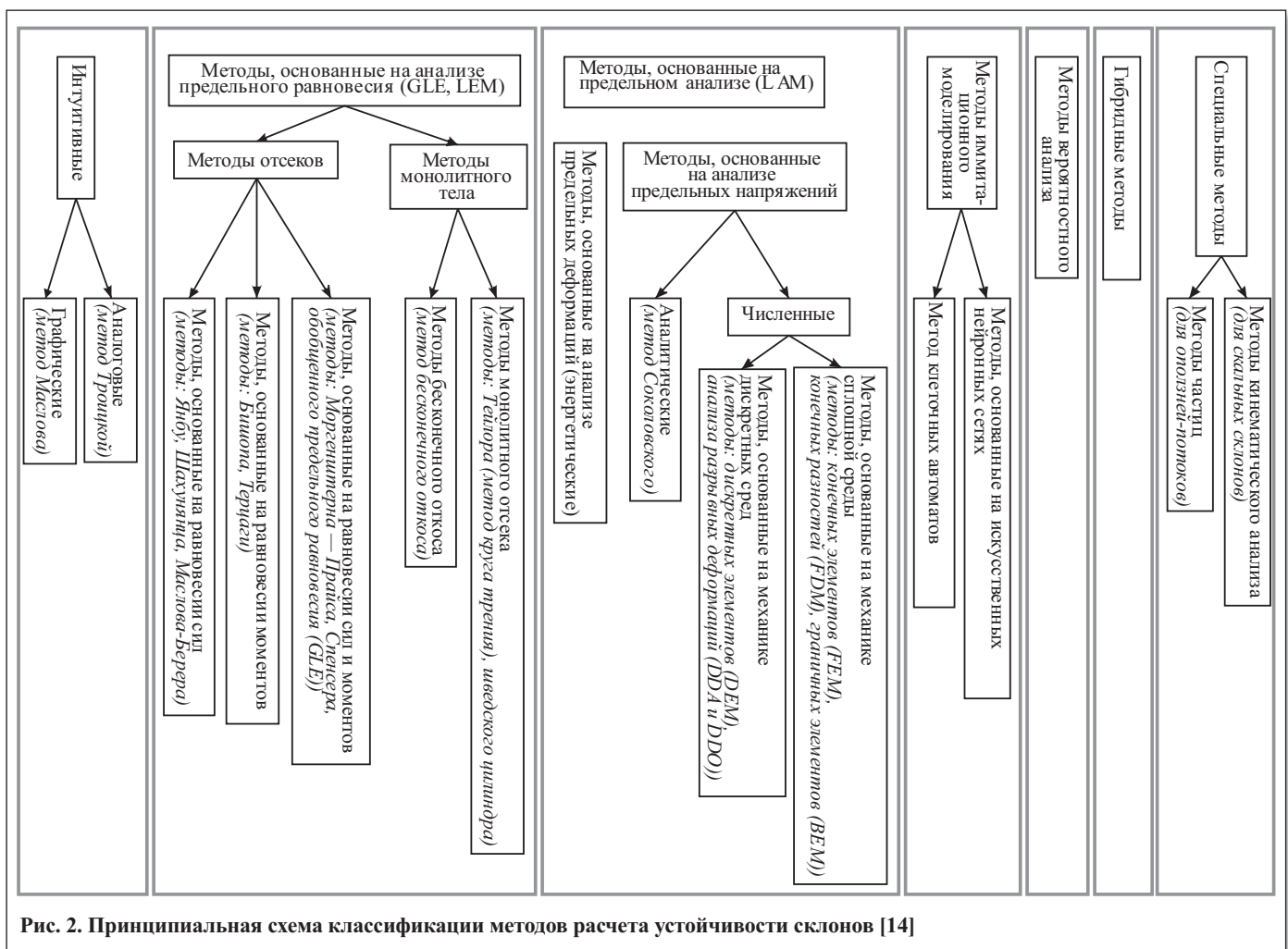


Рис. 2. Принципиальная схема классификации методов расчета устойчивости склонов [14]

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_{Ei} \cdot \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_{Ei} + c_{Ei} \cdot l_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_{Ei} \cdot \sin \alpha_i + F_{ci})}, \quad (3)$$

где i, n — соответственно номер блока и расчетное количество блоков, на которые разбивается оползневый массив; P_i — вес i -го блока, кН; P_{Ei} — то же с учетом взвешивающего действия воды, кН; $P_i \sin_i$ или $P_{Ei} \sin_i$ — сдвигающее усилие (, см. рис. 3); α_i — угол наклона поверхности скольжения i -го блока к горизонту, град.; φ_i — угол внутреннего трения грунта в i -м блоке, град.; φ_{Ei} — то же с учетом взвешивающего действия воды, град.; c_i — удельное сцепление грунта, кПа; c_{Ei} — то же с учетом взвешивания водой, кПа; l_i — длина отрезка дуги скольжения в пределах i -го блока, м; F_{ci} — сейсмическая сила, кН.

Кроме участвующих в приведенных выше формулах сил, в грунтовом массиве имеются еще неизвестные по величине силы бокового давления грунта на вертикальные грани отсеков. Последние силы являются внутренними по отношению ко всему сползающему массиву и внешними по отношению к отдельным выделенным элементам. Так как независимо от их направлений и величин сумма всех вертикальных сил должна быть равной общему весу сползающего клина, в методе круглоцилиндрической поверхности скольжения принимается, что силы бокового давления, действующие на вертикальные грани отдельных элементов грунта, можно не учитывать при определении условий равновесия всего сползающего массива [9].

Все разновидности метода круглоцилиндрической поверхности скольжения сравнительно эффективны при оценке степени устойчивости склонов, но не очень подходят для определения величины оползневой нагрузки.

Одним из наиболее эффективных современных способов решения инженерных, физических и мате-

матических нелинейных задач с использованием вычислительной техники является *метод конечных элементов (МКЭ)*. Это численный метод решения дифференциальных уравнений. Он основан на использовании вариационного принципа Лагранжа. Идея построения вариационно-разностной схемы состоит в том, что при специальном выборе координатных функций получают систему линейных алгебраических уравнений, совпадающих по структуре с системой разностных уравнений [5].

Поверхностные силы, действующие на изучаемую область, представленную системой, состоящей из конечного числа элементов, прикладываются только к узлам, расположенным на внешнем контуре этой области. Объемные силы вычисляются исходя из размеров и плотности элементов и в виде сосредоточенных сил прикладываются к их вершинам.

Основа концепции МКЭ — это разбиение математической модели конструкции на непересекающиеся компоненты простой геометрии, называемые *конечными элементами*. Множество элементов, на которые разбита конструкция, называется *конечноэлементной сеткой*. Механическое поведение каждого элемента выражается с помощью конечного числа степеней свободы или значений функций в узловых точках. Таким образом, поведение математической модели определяется поведением дискретной модели, которая получена путем сборки всех элементов [11].

Основные типы конечных элементов и их свойства называются *атрибутами элементов*. Такими атрибутами являются: собственная размерность, узловые точки, геометрия элементов, степени свободы, узловые силы, определяющие соотношения, свойства сечений [11].

Также задаются *граничные условия*. С позиций математической физики для используемых дифференциальных уравнений граничные условия делятся на два основных типа — существенные и естественные. С позиций метода конечных элементов существенные граничные условия непосредственно влияют на степени свободы модели и накладываются на компоненты глобального вектора неизвестных, а естественные опосредованно влияют на степени свободы через глобальную систему конечноэлементных уравнений и накладываются на их правые части.

При решении задач механики сплошной среды, в частности с использованием теории упругости, широко применяются *смешанные граничные условия*. Это означает, что в данной точке поверхности тела одновременно заданы некоторые компоненты перемещений и поверхностных сил. Например, такие условия возникают при решении геометрически симметричных задач [11].

МКЭ делится на три основных блока: (1) *идеализация* — процесс перехода от исходной физической системы к математической модели; (2) *дискретизация* — уменьшение числа степеней свободы до конечного значения, в результате чего получается дискретная модель; (3) *решение*, которое может быть получено аналитическим или численным путем. Аналитические решения могут быть применены к широкому классу задач, поскольку выражаются в символической форме.

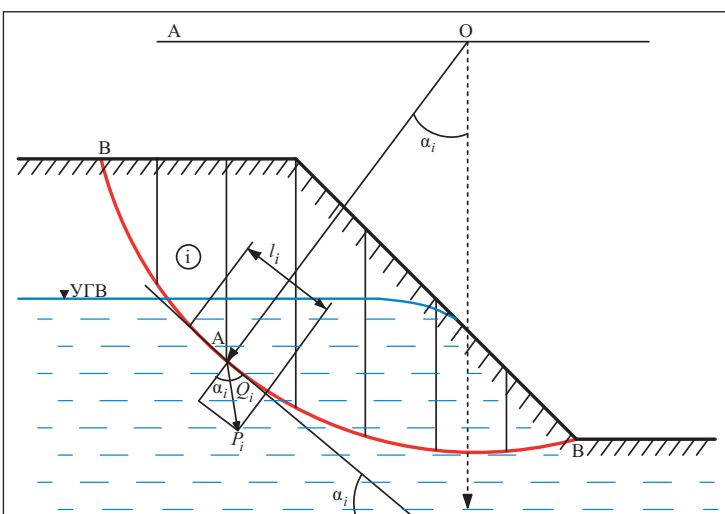


Рис. 3. Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения. Условные обозначения: BB — поверхность скольжения; i — номер блока оползневой массы; l_i — длина отрезка дуги скольжения в пределах i -го блока; α_i — угол наклона поверхности скольжения i -го блока к горизонту; P_i — равнодействующая всех активных сил, приложенных к i -му блоку; Q_i — сдвигающее усилие



Заключение

В статье были рассмотрены классификационные типы оползней, механизмы их образования, скольжения и поведения. Также была проанализирована классификация методов расчета устойчивости оползневых склонов и описаны наиболее эффективные из них. Очевидно, что один и тот же метод расчета не может быть при-

меним ко всем типам оползней, т.к. имеются существенные различия в механизмах их поведения. Кроме того, оползни одного и того же типа могут вести себя по-разному в разных инженерно-геологических условиях. Поэтому встает вопрос об исследовании применимости существующих методов расчета устойчивости склонов в различных инженерно-геологических условиях, который будет рассмотрен в последующих публикациях. ☞

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.Я. Инженерная геодинамика: учебник. М.: КДУ, 2009. 440 с.
2. Емельянова Е.П. К вопросу о механизме и причинах оползней у г. Одессы // Труды Одесского ун-та. Сер. геол. и геогр. 1960. Т. 150. Вып. 7. С. 25–41.
3. Емельянова Е.П. О суффозионных оползнях // Труды ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии. 1968. Вып. 8. С. 4–20.
4. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневого процесса. М.: Недра, 1972. 310 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 539 с.
6. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневого процесса на европейской территории СССР. М.: Недра, 1980.
7. Науменко П.Н. Закономерности развития и механизм катастрофических оползневых смещений на Одесском побережье // Труды ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии. 1968. Вып. 8. С. 50–55.
8. Ниязов Р.А. Оползни в лессовых породах юго-восточной части Средней Азии. Ташкент: Фан, 1974. 148 с.
9. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления. М.: Центральное бюро научно-технической информации, 1986.
10. Саваренский Ф.П. Опыт построения классификации оползней // Труды I Всесоюзного оползневого совещания. Л. — М.: ОНТИ, 1935.
11. Строкова Л.А. Применение метода конечных элементов в механике грунтов: учебное пособие для студентов. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 143 с.
12. Терцаги К. Инженерная геология. М.: Горгеонефтеиздат, 1934. 452 с.
13. Федоров И.В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов. М.: Госстройиздат, 1962. 317 с.
14. Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Комплексная методика расчета устойчивости склона // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований — 2011». Одесса: Черноморье, 2011. 88 с.
15. Skempton A.W. Long-term stability of clay slopes // Geotechnique. 1964. V. 14, № 2. P. 77–101.

ЖУРНАЛ

- о людях
- о землетрясениях
- о неустойчивых склонах и оползнях
- о вулканах
- о наводнениях и ураганах
- ...
- о прогнозировании и предупреждении ЧС
- о важности работы изыскателей

ЖУРНАЛ
GeoRisk

Тел./факс: +7 (495) 366-2684, 366-2095
e-mail: pr@geomark.ru