

УДК 551.435.627

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА  
И РАЗВИТИЯ ЕГО ДЕФОРМАЦИЙ ВО ВРЕМЕНИ**

**В. Н. Захаров, О. Н. Малинникова,  
В. А. Трофимов, Ю. А. Филиппов**

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,  
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Предложен метод оценки возможной потери устойчивости естественных и искусственных склонов, основанный на обобщенном критерии разрушения Кулона–Мора с учетом напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Поиск наиболее вероятной поверхности сдвижения осуществляется пошаговой итерационной процедурой по схеме метода локальных вариаций. Показана необходимость оценки состояния и поведения оползневого тела в процессе динамического сдвижения с целью определения его конечного положения. Приведены примеры такой оценки.

*Оползни, геологические процессы, напряженно-деформированное состояние, сдвиг, метод конечных элементов, ANSYS*

Оползни представляют собой экзогенные геологические процессы, проявляющиеся практически повсеместно. Земная поверхность в значительной части состоит из склонов, большинство которых устойчивы, а другие в силу различных причин неустойчивы либо могут стать таковыми. При этом развитие деформационных склоновых процессов при потере устойчивости может происходить в динамическом режиме, наиболее опасном по своим последствиям, хотя и квазистационарные подвижки грунтовых масс могут представлять серьезную опасность для инфраструктуры, расположенной на оползнях или вблизи от них. В силу этого исследование оползней является актуальной задачей как при строительстве новых объектов, так и при эксплуатации уже возведенных. Систематическое наблюдение за состоянием оползневых склонов позволяет вовремя предсказать, а зачастую предотвратить разрушение откосов (как естественных, так и искусственных) и не допустить угрозы аварийных ситуаций, а значит, избежать человеческих жертв и значительных денежных затрат.

Разнообразие геологического строения склонов порождает многообразие видов оползневых процессов [1, 2], среди которых можно выделить: оползни сдвига (срезающие, консеквентные, срезающе-консеквентные); оползни выдавливания; оползни вязкопластические (оползни-потоки, сплывы, оплывины); оползни гидродинамического выноса (суффозионные, гидродинамического выпора).

Оползни можно классифицировать по признаку наличия потенциальной поверхности сдвижения в пределах оползневого склона, по которой впоследствии происходит оползень. Такая поверхность либо существует еще до начала сдвижения оползня, либо формируется непо-

средственно в момент начала сдвижения. Во втором случае ее форма и расположение в массиве заранее неизвестны и должны быть определены в процессе оценки устойчивости откоса с учетом его напряженно-деформированного состояния. Практически во всех используемых в настоящее время методах оценки устойчивости данная процедура отсутствует, что снижает их достоверность. Далее приводится процедура нахождения такой поверхности сдвижения, и оценка условий равновесия на ней.

Обычно оползни редко наблюдаются на склонах крутизной менее  $10-12^\circ$ . Однако и при больших углах возможность возникновения оползня реализуется только при благоприятных геологических и гидрогеологических условиях, среди которых наиболее важным является достаточная влажность пород, обеспечивающая их пластичность. Наиболее благоприятны для возникновения оползня такие геологические условия, когда в основании оползневого склона залегают водоупорные пласты, а выше лежат породы, способные изменять свои деформационно-прочностные свойства при насыщении влагой.

Оползни, как правило, не начинаются внезапно, и для них характерно вполне определенное развитие во времени. Признаком начавшихся оползневых подвижек служит появление трещин на поверхности земли и связанные с этим проявления (разрывы дорог, смещения и разрушения объектов на поверхности земли и т. п.). Максимальная скорость (до десятков километров в час) движения оползня достигается через некоторый промежуток времени с начала подвижки, а затем движение постепенно замедляется. Именно благодаря постепенному возникновению начало оползневого процесса можно зафиксировать, а затем и прогнозировать его развитие. В настоящее время в зависимости от конкретных условий оползневого склона разработаны и применяются на практике достаточно много методов определения оползневых смещений, большинство из которых основаны на применении геодезических методов [3].

В оползневом процессе можно выделить три фазы: медленную — подготовительную, постепенно переходящую в динамическую, и последующую квазистатическую. Во время динамической фазы формируется фактическая поверхность сдвижения оползневого тела — уже существовавшая либо вновь образующаяся, по которой и происходит его перемещение вниз по склону. В первом случае эта поверхность приурочена к контакту малопрочных осадочных пород и более прочных, подстилающих их. Важную роль играют прочностные свойства именно этого контакта, изменение которых во времени (например, из-за увеличения влажности) и определяет возможность возникновения оползня. В течение динамической фазы смещения оползневого тела могут достигать сотен метров. Свойства контакта при этом могут существенно измениться, вследствие чего скорость сдвижения постепенно уменьшается вплоть до нуля, т. е. активная фаза оползня завершается в новом равновесном состоянии.

При сложном строении оползневого тела, т. е. когда внутри него существует несколько малопрочных контактов, определение поверхности сдвижения значительно усложняется.

Последующая квазистатическая фаза оползня связана с вязкопластическим движением собственно оползневого тела, существенно более медленным (до нескольких метров в год). Очевидно, что это движение происходит внутри самого тела без нарушения контакта с подстилающими породами.

### **УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ И ОПОЛЗНИ**

Основной задачей при описании состояния естественных и искусственных склонов на первой подготовительной фазе является количественная оценка запаса их устойчивости, т. е. определение некой величины, характеризующей то, насколько они далеки от разрушения.

Так как строение оползней, причины их возникновения и условия, способствующие их развитию, достаточно разнообразны, то и методы расчета их устойчивости применяются разные. Выбор метода расчета устойчивости обусловлен структурой оползня, формой выявленной или

намечаемой поверхности скольжения, возможностью учета всех силовых воздействий на оползень, определяющих степень его устойчивости: напряженно-деформированное состояние горных пород, слагающих оползень, постоянные или временные нагрузки, гидродинамическое давление, гидростатическое взвешивание, ускорение при сейсмических колебаниях и др. [3]. Отметим, что во всех этих методах в качестве потенциальной поверхности разрушения (скольжения), как правило, задается достаточно простая поверхность. В плоском случае это прямая либо ломаная линия, часть окружности, логарифмической спирали и др. Зачастую они в той или иной степени совпадают с естественными нарушениями в прибортовом массиве. Кроме того, всегда возникает проблема учета подземных пространств, образуемых при отработке подкарьерных и прибортовых запасов полезного ископаемого.

Рассматриваемый далее подход лишен этих недостатков и основывается на анализе напряженно-деформированного состояния оползневого склона с использованием метода локальных вариаций для нахождения наиболее опасной поверхности, по которой возможно сдвижение оползня.

Комплекс геомеханических задач, связанных с рассматриваемой проблемой, включает в себя два основных направления. Во-первых, это расчет и соответствующая интерпретация напряженно-деформированного состояния массива горных пород. В результате выявляются зоны концентрации напряжений и разгрузки, зоны первичного разуплотнения и разрушения массива. Во-вторых, оценка устойчивости основных элементов горно-геологического строения или горнотехнической конструкции массива горных пород. Эта оценка ориентируется на использование известного из соответствующих расчетов напряженно-деформированного состояния горных пород.

Сложность анализа геомеханической обстановки обусловлена многопараметричностью возникающих задач. Как правило, большинство параметров рассчитаны недостаточно точно, а некоторые, такие как интегральный модуль упругости, характеризующий массив в целом, могут быть определены достаточно точно только обратным пересчетом с использованием тех или иных натурных замеров, например сдвижений массива горных пород.

Такое положение дел приводит к необходимости включения в методологию оценочных расчетов принципа варьированности определяющих параметров в пределах, соответствующих физической постановке задачи. Это позволяет установить характер и степень их взаимного влияния и выявить те из них, с которыми в основном связана та или иная ситуация. Стратегия оценочных расчетов должна основываться на фиксации по возможности большего числа параметров, достаточно стабильных для конкретного массива горных пород, и вариации остальных. В случае развития горных работ оценки подобного рода должны регулярно повторяться с учетом изменяющейся обстановки и уточнением тех или иных деформационных параметров.

Степень устойчивости откоса оценивается по коэффициенту запаса устойчивости, определяемому по отношению суммы “удерживающих” сил к сумме “сдвигающих” сил по наиболее опасной поверхности сдвижения.

Коэффициент запаса устойчивости — общепринятая характеристика склона или откоса. В естественном состоянии, когда склон неподвижен, коэффициент всегда больше единицы, а в момент начала сползания равен единице. Существуют нормативные значения для этого коэффициента, которые предусматривают определенный запас устойчивости склона в зависимости от его местоположения и важности с точки зрения обеспечения безопасности [1–3].

Конкретизируем понятие коэффициента запаса устойчивости и введем в рассмотрение интегральный критерий прочности, ассоциированный с произвольной достаточно протяженной поверхностью в массиве горных пород. В плоской постановке, которая принимается при решении задач на устойчивость, эта поверхность представляется в виде линии, которую обозначим  $L$ .

Будем считать, что эта линия своими концами выходит на поверхность обнажения, является достаточно гладкой, не имеет самопересечений, на ней определены начало и конец. Подобного рода линии будем называть допустимыми линиями реализации критерия разрушения.

На этой линии запишем функционал прочности в виде

$$F_L = \frac{\int [C(l) + \operatorname{tg} \rho(l) \sigma_n(l)] dl}{\int_L \tau_n(l) dl}, \quad (1)$$

где  $C(l)$ ,  $\rho(l)$  — сцепление и угол внутреннего трения на поверхности вдоль линии  $L$ ,  $l \in L$ ;  $l$  — координата вдоль  $L$ ;  $\sigma_n(l)$ ,  $\tau_n(l)$  — нормальные и касательные компоненты напряжений на той же поверхности.

Очевидно, что числитель представляет собой интегральное предельное значение удерживающих сил, а знаменатель — интегральное значение сдвигающих сил по линии  $L$ . Сопоставление этих сил и составляет физическую сущность функционала (1) как интегрального критерия прочности по линии  $L$ . Он является обобщением условия прочности Кулона–Мора, который для каждой точки на  $L$  можно записать как

$$G_L = \frac{C(l) + \operatorname{tg} \rho(l) \sigma_n(l)}{\tau_n(l)}. \quad (2)$$

Исходя из (1), можно отметить следующее:

— если  $F_L < 1$  на выбранной линии, то массив заведомо не может сохранить целостность и в нем должно произойти нарушение сплошности по некоторой поверхности с выходом на соответствующие обнажения;

— если же  $F_L > 1$  на выбранной линии, то это еще не значит, что нет другой линии  $L$ , на которой значение  $F_L$  может оказаться меньше единицы.

Иначе говоря, нужно перебрать на контролируемом участке все допустимые линии и посмотреть, нет ли среди них таких  $L$ , на которых  $F_L < 1$ . Если хотя бы одна такая линия найдется, то в массиве обязательно произойдет нарушение сплошности, которое локализуется по некоторой поверхности.

Перебор всех допустимых линий с одной и той же точкой начала  $a$  эквивалентен поиску только одной линии  $L^*$ , на которой реализуется минимум функционала (1). При осуществлении этого поиска примем во внимание, что функционал  $F_L$  непрерывно зависит от  $L$ , т. е. малому изменению положения линии соответствует малое изменение величины  $F_L$ . Непрерывность дает возможность сформировать численный многошаговый алгоритм поиска такой линии, основанный на малой вариации некоторой пробной линии. Под пробной линией в начальный момент понимается произвольная допустимая линия  $L$ , а в дальнейшем — каждая последующая постоянно изменяющаяся от шага к шагу линия, получающаяся в результате применения алгоритма.

При этом каждое изменение положения пробной линии должно сопровождаться уменьшением значения  $F_L$ . Действие алгоритма сводится к следующему:

- 1) на пробной линии  $L$  вычисляется значение  $F_L$ ;
- 2) каким-то образом изменяется (варьируется) пробная линия (способ вариации и определяет суть алгоритма);
- 3) на новой линии  $L$  вычисляется соответствующее ей значение  $F_L$ , которое обозначим  $\tilde{F}_L$ ;

4) если  $\tilde{F}_L < F_L$ , то эта линия теперь сама становится пробной, как  $L$ , и вся процедура (1–4) повторяется, но уже относительно нее;

5) если  $\tilde{F}_L > F_L$ , то эта вариация отменяется и происходит возврат к пробной линии  $L$ ;

6) задается другая вариация линии  $L$ , и вся процедура (1–5) повторяется.

Численные расчеты показывают, что при корректных вариациях пробных линий данный алгоритм однозначно приводит к сколь угодно малой окрестности линии, на которой реализуется минимум  $F_L$ .

### ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ

Остановимся более подробно на некоторых деталях численного алгоритма [4]. Он реализуется в виде набора программ, осуществляющих как подготовительную работу, связанную с формализацией задачи, так и собственно нахождение и анализ напряженно-деформированного состояния расчетных областей. Первая пробная линия, с которой начинается поиск потенциально возможной поверхности разрывного смещения, задается посредством  $N$  упорядоченных точек и отрезков прямых, соединяющих эти точки. Таким образом, выбранная пробная линия в алгоритме — это ломаная линия, у которой начальная точка  $a$  “закреплена” и в вариационных процедурах не участвует.

Для каждого  $i$ -го звена ломаных линий, которые находятся в результате выполнения процедур (1–6) алгоритма, определяются свои предельные удерживающие и сдвигающие силы:

$$T_{C_i} = \int_{l_{i-1}}^{l_i} (C_i + \operatorname{tg} \rho_i \sigma_n^i) dl, \quad T_i = \int_{l_{i-1}}^{l_i} \tau_n^i dl, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Начиная с первой пробной линии и для всех последующих вычисляются значения

$$F_L^j = \left( \frac{\sum_{i=1}^N T_{C_i}}{\sum_{i=1}^N T_i} \right)_j, \quad j = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где  $j$  — порядковый номер пробной линии.

При этом  $F_L^j$  составляют последовательность убывающих чисел, стремящихся с увеличением числа вариаций к предельному значению  $F_L^*$ .

Таким образом, в результате численной реализации процедур (1–6) алгоритма становятся известными потенциальная поверхность возможного разрушения, которая определяется линией  $L^*$ , и соответствующее значение минимума функционала (1). Обозначим его через  $K^*$  и назовем коэффициентом стойкости потенциальной поверхности разрушения. Чем больше  $K^*$  по сравнению с единицей, тем больше запас прочности. При  $K^* \leq 1$  интегральная сдвигающая сила по потенциальной поверхности разрушения больше соответствующей прочности на сдвиг.

Теперь, когда известна потенциальная поверхность разрушения, и ей в плоском случае соответствует линия  $L^*$ , можно найти, в каких точках и на каких участках или звеньях этой линии значения  $G_L^*$  и  $T_{C_i}^*/T_i^*$ , соответствующие (2) и (3), больше или меньше единицы, и на сколько.

Исходя из определения  $K^*$ , получим, что  $T_{C_i}^*/T_i^*$  — коэффициент стойкости участка. Обозначим его  $K_i^*$ .

Итак, появляется дополнительная возможность оценить вклад каждого участка линии  $L^*$  в значение минимума функционала (1). На каких-то участках  $K_i^* < 1$ , следовательно, они должны подвергаться разрушению. На других участках, наоборот,  $K_i^* > 1$ , а значит, есть запас прочности. В этих случаях общая оценка прочности складывается из совокупности тех и других участков.

В общем, для потери несущей способности массива нет необходимости, чтобы участки с  $K_i^* < 1$  перекрывали всю протяженность линии  $L^*$  от одного обнажения до другого. Часть поверхности возможного разрушения может по расчетам иметь запас прочности, но не достаточный для компенсации потери несущей способности в другой части поверхности. В результате произойдет разрывное смещение по всей поверхности.

Введем в рассмотрение еще один коэффициент стойкости  $K_\Sigma^*$ , который определяется следующим образом:

$$K_\Sigma^* = \frac{\sum_{i=1}^n T_{C_i}^*}{\sum_{i=1}^n T_i^*}, \quad n = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Этот коэффициент отражает изменение запаса прочности по мере продвижения по линии  $L^*$  от ее начала к концу. При  $n = N$   $K_\Sigma^* = K^*$ , т. е. является коэффициентом стойкости потенциальной поверхности разрушения в целом.

В заключение обратим внимание на то, что в предложенном алгоритме минимум функционала  $F^*$  связан с фиксированной начальной точкой пробной линии  $L$ . Выбор этой точки основан на анализе напряженного состояния горных пород около выработки и на опыте горной практики. Возникающая при этом некоторая неопределенность легко устраняется в результате сравнения значений  $K^*$ , связанных с разными, но тоже вероятными начальными точками.

Кроме того, потенциальные поверхности разрушения при  $K^* \leq 1$  на линии  $L^*$  могут проявиться в массиве горных пород в виде разрывных смещений как в квазистатической, так и в динамической форме. Это в значительной мере зависит от того, как и насколько изменится коэффициент внутреннего трения между “берегами” разрывного смещения в связи с образованием пространственной структуры разрушения, локализованной по соответствующей поверхности.

Подход, основанный на идее предельного равновесия грунтового или скального массива, локализованного по некоторой поверхности (заданной либо определяемой в процессе решения) на сегодняшний день является практически единственным, используемым на практике. Недостатки его очевидны. Согласно принятой концепции, при потере устойчивости склона (откоса) разрушение должно произойти сразу по всей длине потенциальной поверхности скольжения. При этом очевидно, что выполнение условия  $F_L = 1$  для начала движения обязательно.

Однако фактически на некоторых участках поверхности  $L^*$  локальный коэффициент запаса устойчивости  $F_{L^*}$  может оказаться и больше, и меньше единицы. В связи с этим разрушение и движение может начаться там, где  $F_{L^*} < 1$ , особенно если  $L^*$  достаточно велика. При этом возникает движение грунтовых масс, которое может нарушить сцепление по вероятной поверхности движения и на участках, где первоначально  $F_{L^*} > 1$ . Тем самым ставится под сомнение условие  $F_L = 1$ , так как разрушение может произойти и при  $F_L > 1$ , ввиду динамического характера развития оползневого процесса. В основном это характерно для естественных оползневых склонов, сформированных древними оползневыми процессами.

Отметим, что развитый метод автоматически учитывает наличие в исследуемой области различного рода нарушений. Если прочностные характеристики вдоль нарушения достаточно малы, а его ориентация совместима с возможным сдвижением, то формирующаяся поверхность скольжения частично или полностью локализуется по нему.

Приведенный метод — всего лишь инструмент для исследования состояния склона, поэтому при проведении расчетов всегда следует контролировать получающиеся результаты, поскольку возможно возникновение разного рода неустойчивости, в основном связанной с алгоритмом модификации пробной поверхности (линии).

### ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЯ

Таким образом, возникает необходимость исследовать динамику процесса потери устойчивости склона, поскольку при традиционном подходе, описанном выше, полностью исключается возможность определения конечной стадии процесса, т. е. конечного состояния оползня.

Динамика процесса легко может быть описана с помощью программного комплекса ANSYS, располагающего большим набором как деформационно-прочностных свойств материалов, так и алгоритмов, описывающих деформационные процессы внутри материальных объектов и на их границе.

Далее рассматривается оползневый склон на южном побережье Черного моря в районе г. Сочи (Мамайский оползень). На рис. 1, 2 приведены космоснимок оползневой участка и соответствующая привязка профильных линий, по которым имеются геологические разрезы. Эти линии практически параллельны между собой. Один из таких разрезов представлен на рис. 3.



Рис. 1. Космоснимок исследуемого оползневой участка

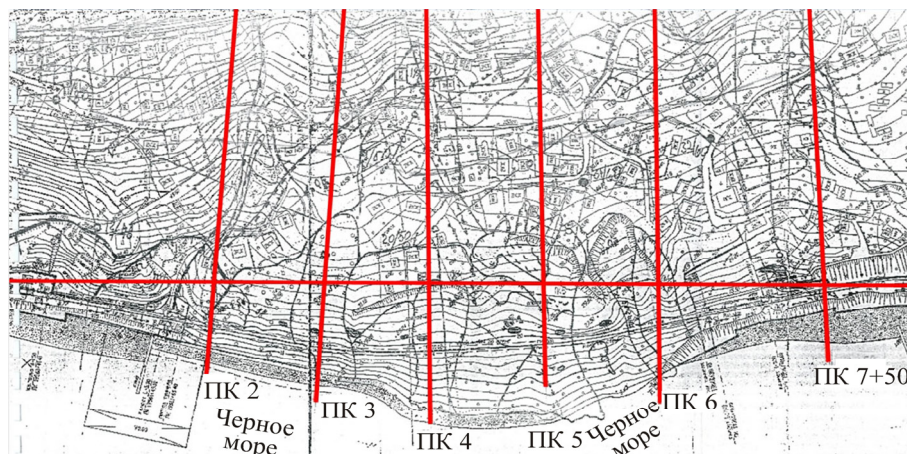


Рис. 2. План привязки профильных линий



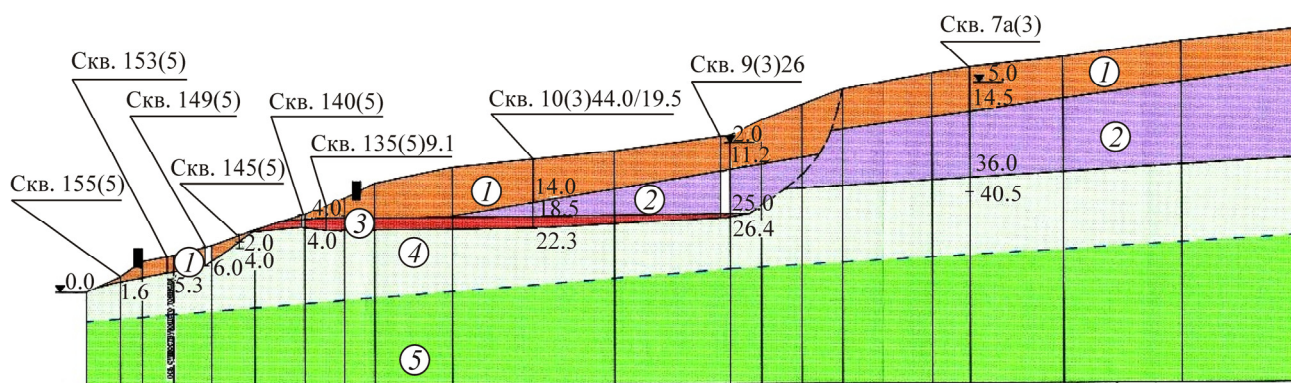


Рис. 3. Геологический разрез участка: 1 —  $dP Q_{iv}$  — современные оползни, отложения — глины; 2 —  $dP Q_{iii-iv}$  — древнеоползневые накопления — глины; 3 —  $m Q_{iii}$  — морские галечные отложения — Карангатская терраса; 4 —  $P_{3sc}$  — аргиллиты сочинской свиты — раздробленные, дислоцированные; 5 —  $P_{3sc}$  — аргиллиты сочинской свиты — массивные, слаботрешиноватые

Рассматриваемый оползень имеет древнее происхождение и в настоящий момент находится в квазистатическом равновесии. Задача состоит в том, чтобы определить условия возможного перехода его в динамическую фазу сдвижения.

Имеющиеся геологические разрезы не полностью перекрывают всю область оползня как по простиранию вдоль морского побережья, так и вглубь, в сторону гор. Этот факт при моделировании может в какой-то степени исказить общую картину происходящих процессов.

Использование данных по всем разрезам позволяет с помощью сплайновых аппроксимаций построить пространственную модель исследуемого участка. В плане она представляет собой прямоугольник, две стороны которого — крайние профильные линии, третья сторона — прямая, перпендикулярная к ним на расстоянии  $\sim 250$  м от морского побережья. Береговая часть модели продлена плоскостью, уходящей под воду. Собственно расчетная область — это объем, построенный на рассматриваемом прямоугольнике посредством вертикальных плоскостей, соответствующих сторонам прямоугольника. Сверху она ограничена рельефом поверхности, снизу — это горизонтальная плоскость, расположенная на некоторой глубине (50–200 м в зависимости от местоположения внутри прямоугольника) от земной поверхности (рис. 4).

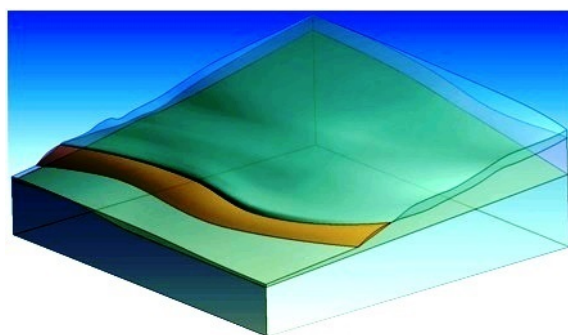


Рис. 4. Трехмерная модель

В соответствии с методологией конечноэлементных расчетов на границах области задаются граничные условия: на первых двух вертикальных поверхностях — нулевые нормальные смещения. Нижняя поверхность расчетной области полностью закреплена от перемещений. Дневная поверхность свободна от нагрузок. На плоскость, уходящую под воду, действует сила тяжести воды. Что касается вертикальной стороны объема, расположенной вдали от побере-



жья, то на ней граничные условия варьировались в зависимости от решаемой задачи. Это было закрепление либо по нормальным смещениям по всей поверхности, либо по ее части в соответствии с геологическим строением массива. В частности, в некоторых задачах считалось, что породы верхней части разреза могут сдвигаться по склону, скользя по контакту с более глубоко расположенными. В этом случае часть вертикального сечения, соответствующая этому слою, не ограничивалась в нормальных смещениях в направлении к побережью.

При моделировании динамики оползневого процесса важную роль играют контакты литологических разностей в расчетном объеме. Оценка коэффициента устойчивости по предложенной методике позволила выявить примерные границы значений коэффициента трения по этим поверхностям, когда массив теряет устойчивость. При расчетах их свойства варьировали, в результате чего получен широкий спектр возможных деформационных процессов изучаемого оползневого склона в динамической фазе.

Нагружающим фактором, первопричиной деформаций в массиве, является сила тяжести, поскольку предполагалось, что оползень сформировался в достаточно отдаленном прошлом, и весь процесс деформирования пока остается неопределенным и не поддающимся адекватному моделированию. В настоящее время оползень практически неподвижен, если не принимать во внимание его медленное вязкоупругое деформирование, измеряемое сантиметрами в год. Следовательно, его можно считать находящимся в равновесии под действием сил тяжести, и такое состояние может сохраняться неопределенно долгое время.

Однако достаточно быстрое изменение деформационно-прочностных свойств контактов слагающих пород, особенно в верхней части разреза, примыкающей к дневной поверхности, например в результате увлажнения, существенно изменяет условия равновесия в рассматриваемом объеме. Вследствие этого могут возникнуть практически неограниченные подвижки с большими скоростями. Рассмотрим, при каких условиях это может произойти.

Недостаточный охват расчетной моделью всей территории оползня обуславливает возможность значительно упростить задачу и рассматривать ее в плоской постановке, выбрав для этого характерный разрез (см. рис. 3). Такая плоская модель приведена на рис. 5. Задача решалась в упругопластической постановке с учетом возможного возникновения больших геометрически нелинейных деформаций.

Отметим, что комплекс ANSYS обладает широким спектром средств решения контактных задач с самыми разнообразными условиями на контакте деформируемых тел. Это достигается автоматическим формированием сетки контактных элементов по границе сдвигающихся поверхностей. В том случае, когда развиваются значительные смещения, расчет идет пошагово с непрерывным перестроением сетки контактных элементов для обеспечения локальной малости деформаций. Это дает возможность решать динамические контактные задачи для деформируемых тел.

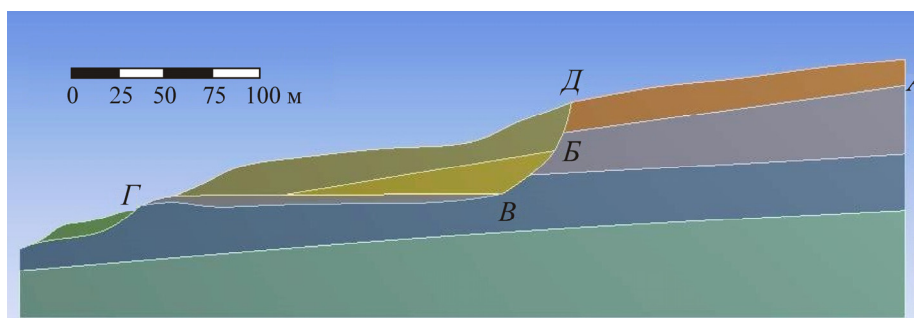


Рис. 5. Разрез плоской модели

Модель содержит довольно много контактов, по которым могло бы происходить сдвиге-ние. С целью упрощения представления и анализа получаемых результатов свойства контактов варьировались только на поверхностях *АВ* и *ДБВГ*, а остальные были спаяны. Эти поверхности были выбраны с учетом результатов инклинометрических исследований и данных мониторинга поперечного смещения оси скважин, пробуренных в оползневом массиве, показавших заметное отклонение от вертикали (до 8–9 см) в некоторых скважинах на глубинах, соответствующих указанным поверхностям. Анализ, выполненный с использованием описанного метода, в слу-чае слабых контактов по этим поверхностям показал, что сдвигение будет происходить имен-но по ним без формирования каких-либо новых поверхностей по сплошному материалу. Фак-тически предлагаемый подход представляет собой альтернативу традиционному вычислению коэффициента запаса устойчивости. Достаточно проследить состояние массива на протяжении какого-то промежутка времени с тем, чтобы убедиться в его устойчивости или неустойчивости.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6–9 представлены характерные особенности изменения определяющих парамет-ров — сдвигов оползневого массива в сторону побережья, вертикальных подвижек, скорости сдвигения, ускорения. При расчетах полагалось, что поверхность *АБВГ* наиболее подвержена нарушениям, т. е. на ней задавался наименьший коэффициент трения, который варьировался в ходе расчетов. При этом нижележащие породы практически оставались неподвижными.

Деформационные параметры, относящиеся к материалу, слагающему оползень: удельная масса  $1921 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , модуль упругости (Юнга)  $5\cdot 10^7 \text{ Па}$ , коэффициент Пуассона 0.45, модуль все-стороннего сжатия  $1.67\cdot 10^8 \text{ Па}$ , модуль сдвига  $1.72\cdot 10^7 \text{ Па}$ .

На поверхностях сдвигения *АВ* и *ДБВГ* коэффициент трения изменялся для различных вари-антов расчета от 0.04 до 0.5. Отметим, что на поверхности *ДБВ* коэффициент трения не оказывал существенного влияния на сдвигение оползневого тела, так как оно достаточно быстро отделя-лось от подстилающего массива с образованием зияющей трещины по поверхности *ДБВ*.

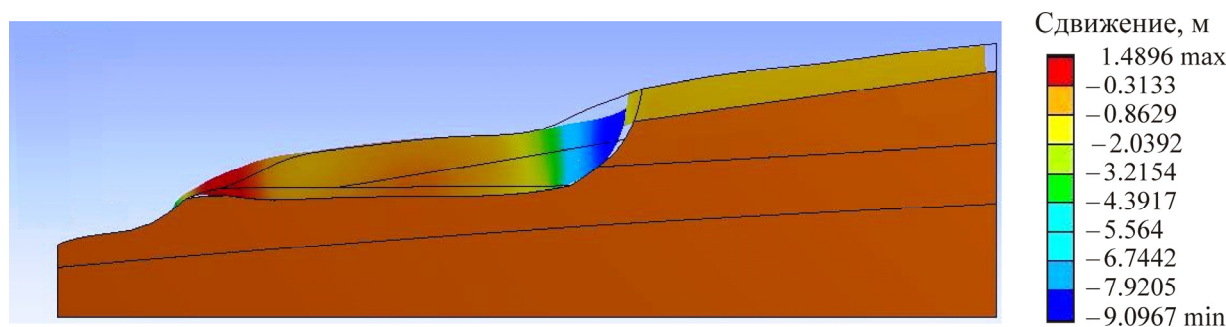


Рис. 6. Конечное положение движущего объема при коэффициенте трения по *АВ* и *ВГ*, равном 0.1

При значении коэффициента трения по поверхности *ВГ* больше 0.06 наблюдается лишь не-значительное сдвигение оползня. На рис. 6 показано его конечное положение при коэффи-циенте трения по *АВ* и *ВГ*, равном 0.1, а цветом — соответствующие ему вертикальные сдвиже-ния. При этом в точке *Д* образуется уступ, высота которого зависит от совокупности коэффи-циентов трения по всей поверхности сдвигения. Весь процесс деформирования занимает  $\sim 13 \text{ с}$ , как следует из рис. 7, на котором показаны минимальные и максимальные вертикальные сдви-жения массива на протяжении 45 с начиная с момента начала деформирования. После 13-й се-кунды они остаются постоянными, что свидетельствует об остановке движения оползневого тела в новом положении равновесия. При этом максимальное значение горизонтального сдвига составляет  $\sim 11 \text{ м}$ , а высота уступа  $\sim 9 \text{ м}$ .

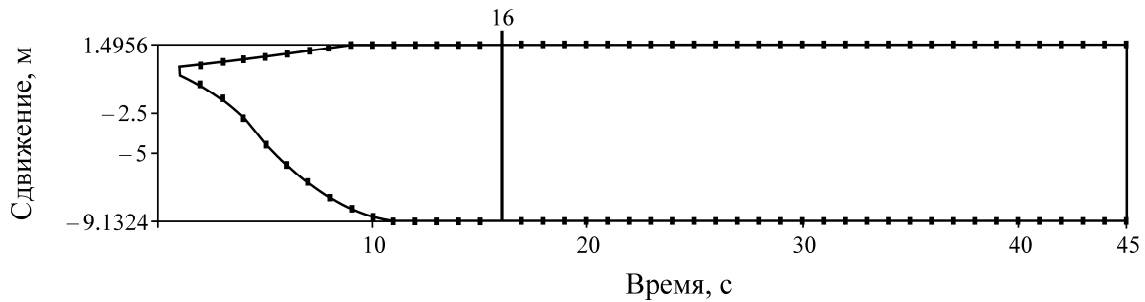


Рис. 7. Минимальные и максимальные вертикальные сдвигения массива на протяжении 45 с

Отметим, что поверхность *ВГ* практически горизонтальна, а в точке *Г* она даже несколько выпукла вверх, что препятствует сдвигению оползня и способствует остановке его горизонтального сдвигения. Таким образом, существенная подвижка возможна только при очень малых значениях коэффициента трения ( $< 0.05$ ). Однако при этом она может достигать значительных величин, что подтверждают приведенные далее рисунки.

На рис. 8 показана конфигурация сползающего оползневого массива, а цветом — значения горизонтальных смещений на 30-й секунде с начала движения оползня при значениях коэффициента трения на *ВГ* — 0.04 и на *АБ* — 0.05. Максимальные смещения составляют  $\sim 110$  м.

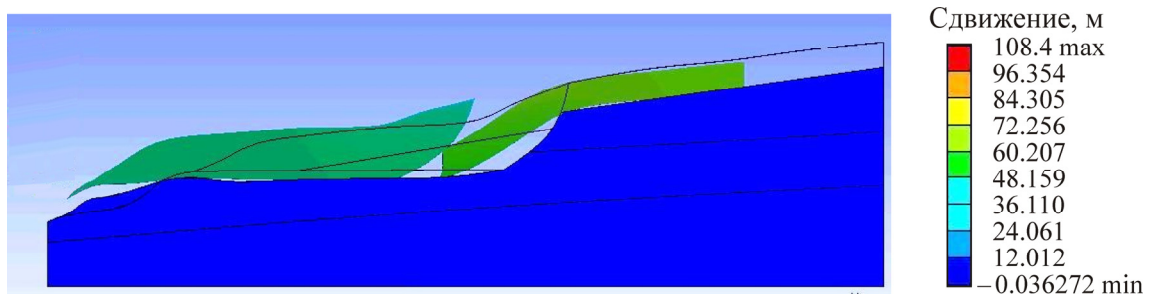


Рис. 8. Конфигурация сползающего оползневого массива на 30-й секунде с начала движения

Интересно рассмотреть скорость движения оползневых тел в этом случае. На рис. 9 отображены скорости смещения на 45-й секунде движения. Они составляют  $\sim 10$  м/с, а максимальное смещение  $\sim 200$  м. При этом состояние массива далеко от равновесного и динамическое смещение оползня продолжается.

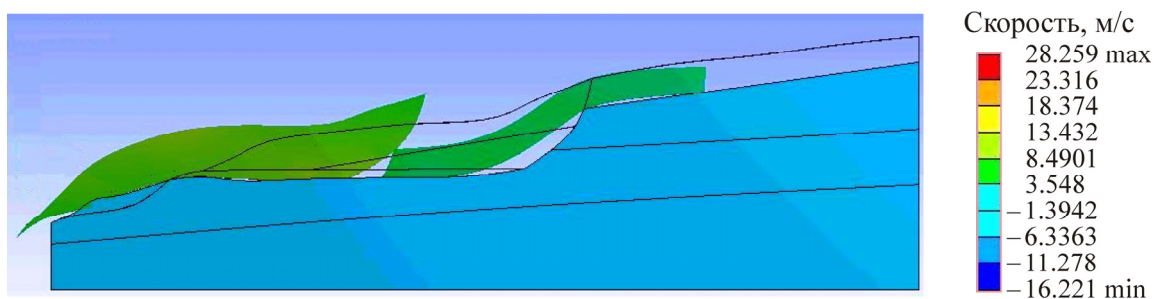


Рис. 9. Скорость смещения на 45-й секунде движения

## ВЫВОДЫ

Тело оползня в процессе перемещения деформируется с возможным разрушением и нарушением сплошности в отдельных частях сдвигающегося массива. Расчеты с варьированием определяющих процесс параметров, а именно коэффициентов трения по поверхностям скольже-

ния, деформационно-прочностных параметров тела оползня и др. приводят к выводу, что динамическое развитие оползня возможно лишь при малых значениях угла внутреннего трения ( $< 4-5^\circ$ ) на потенциальных поверхностях сдвига. Это значение определяется средним уклоном поверхности скольжения на отдельных участках оползня. На участках, где угол внутреннего трения больше уклона, будет реализовываться устойчивое состояние, а где меньше – возможны подвижки как в статическом, так и динамическом режиме. Вид такой подвижки определяется профилем поверхности сдвижения в совокупности с коэффициентом трения по ней.

Важен также динамический эффект. Когда развивается динамический процесс, тело оползня зачастую приобретает значительную кинетическую энергию. В этом случае силам трения, которые стремятся остановить движение оползня, противопоставляется не только сила тяжести, но и инерциальные силы движущейся массы. При этом коэффициент трения зависит от скорости движения, уменьшаясь при возрастании скорости.

Рассмотренные два варианта оползневого сдвижения массива с традиционной точки зрения предельного равновесия следует отнести к потере устойчивости, так как в этих случаях коэффициент запаса устойчивости был меньше единицы. Отметим, однако, их принципиальные различия. В первом случае после сдвига в горизонтальном направлении на  $\sim 11$  м за 13 с весь процесс практически завершился в новом состоянии равновесия, т. е. откос вновь стал устойчивым, возможно с незначительным коэффициентом запаса устойчивости. Во втором случае в границах расчетной схемы не удалось получить равновесного состояния, хотя сдвиг уже достиг  $\sim 200$  м, а его скорость составила  $\sim 10$  м/с. Такое качественное различие процессов связано лишь с различием в коэффициенте трения по поверхности сдвига, которое не так уж и велико: в первом — 0.1, а во втором — 0.04.

Приведенные примеры показывают, насколько важно не только оценить устойчивость откоса, но и рассчитать последствия от ее потери. На первый план выходит точность определения деформационно-прочностных свойств контактов между слоями, слагающими откос, в зависимости от внешних воздействий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рекомендации** по количественной оценке устойчивости оползневых склонов / ПНИИИС. — М.: Стройиздат, 1984.
2. **Рекомендации** по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления. — М.: ЦБНТИ, 1986.
3. **Руководство** по проектированию и устройству заглубленных инженерных сооружений / НИИСК Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1986.
4. **Кузнецов С. В., Трофимов В. А.** Алгоритм и метод поиска предельных поверхностей в окрестности выработанных пространств // ФТПРПИ. — 2005. — № 2.

*Поступила в редакцию 7/IV 2014*