

*Шадуц К.Ш., д-р геолого-минералогических наук, проф.  
Кубанского государственного аграрного университета,  
г. Краснодар, Россия*

***Оползни в лессовых породах на примере правобережья  
реки Кубань***

***Landslides in loessial races on example of right-bank  
of the Kuban river***

В статье описаны особенности деформаций лессовых откосов берегов р. Кубани, которые подстилаются пластичными глинами и суглинками. Рассмотрена задача «высокой» консоли, подстилаемой пластичным материалом. Численным методом найдено решение сложной задачи об устойчивости вертикального откоса, когда возникают трещины, отделяющие слой, выдавливающий в реку пластичный вал.

In article the features of loessial slope deformations on the Kuban river coasts which are underlay by the plastic clays and loams are described. The problem of the “high console”, underlaying by a plastic material is considered. By the numerical method it is presented the solution of the vertical slope stability problem when the cracks are arised, separating a layer, which is squeezing out to the river a plastic shaft.

Характерной особенностью лессовых берегов является образование вертикальных откосов (рис. 1).

Методику расчета устойчивости вертикальных откосов и склонов рассмотрим на примере одного из участков берега р. Кубань, вблизи крупного равнинного Краснодарского водохранилища.

Лессовидные грунты широко развиты на эпигерцинской платформе Северного Кавказа. Они занимают значительную часть Азово-Кубанской аккумулятивной равнины и примыкающих к ней склонов Ставропольской возвышенности. Больших мощностей (от 15 до 30 м) лессовые породы достигают на правобережье р. Кубань

в пределах от г. Армавира до г. Усть-Лабинска и на Кубано-Лабинском водоразделе.



Рис. 1. Вертикальные откосы в лессовых грунтах

Лессовидные суглинки эолового происхождения средне-верхнеплейстоценового возраста занимают высокие надпойменные террасы и междолинные водораздельные участки. Характерна третья правобережная надпойменная терраса р. Кубань. Она во многих местах расчленена балками и оврагами, интенсивно подмывается рекой. Скорость размыва достигает 10-15 м в год. Увеличение крутизны берегового склона приводит в широкому развитию оползней.

Последние годы экзогенные процессы и, в частности, оползни все чаще активизируются в связи с ошибками в хозяйственной деятельности человека. Примером может служить район г. Усть-Лабинска, расположенного на правом берегу р. Кубань, в 70 км восточнее г. Краснодара.

Правый берег р. Кубань в среднем ее течении на участке от станции Темижбекской до станции Воронежской возвышается над урезом воды на 45-50 м и сложен с поверхности до 17-25 м толщиной

лессов и лессовидных суглинков эолово-делювиального генезиса с горизонтами погребенных почв, а в подошве с песчаными прослоями ( $dvQ_{II-IV}$ ).

Подстилаются лессовидные отложения мощной (до 30 м) толщей пестроцветных плотных делювиальных глин апшеронского яруса неогена ( $N_2^3 ad$ ). В основании склона встречены аллювиально-делювиальные пластичные суглинки с прослоями водоносных песков и супесей ( $N_2^3 ad$ ). Мощность слоя 16–18 м.

Грунтовые воды залегают на глубине 30–35 м в песчано-супесчаных прослоях. Они выклиниваются в подошве склона на высоте 2–3 м над меженным уровнем реки.

Значения основных физико-механических свойств грунтовых разностей приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Физико-механические свойства грунтов

№ п/п	Наименование грунта	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, градусы	Схема сдвигового испытания
1.	Лесс и лессовидные суглинки	1,79	0,05	17	Ускоренный пол
			0,11	19	Ускоренный при естественной влажности
2.	Глина пестроцветная слабо выветрелая	2,1	0,12	16	по ГОСТ
3.	Глина сильно выветрелая	1,95	0,03	15	-----
4.	Суглинок пластичный	1,95	0,04	23	-----

До последнего времени основным фактором оползнеобразования здесь был подмыв правого берега. Скорость течения реки 0,9–1,1 м/с. превышала предельную неразмывающую, составляющую для грунтов основания склона 0,6–0,7 м/с.

Подвижки на склоне начинались обычно с нижней части. Оползень развивался регрессивно. Отрыв блоков лессовых пород происходил с образованием практически вертикальных трещин, проходящих до подстилающих глин. Ширина отрывающихся блоков составила 3–5 м. При перемещении блоков вниз по склону по кровле плотных пестроцветных глин срезается верхний, сильно выветрелый слой порядка 1,5–2,0 м. Сползающие массы грунта, достигнув подошвы склона, выдавливают пластичные суглинки, создавая валы

выпираания, выдвинутые в русло Кубани на 20–30 м. Возникавший контрбанкет обеспечивал временную стабилизацию склона. После размыва контрбанкета подвижки вновь возобновлялись. Продолжительность цикла составила 30–50 лет.

Самый крупный зафиксированный здесь оползень произошел в 1926 г. в связи с Кубанским землетрясением. Высокая для степного района сейсмичности участка объясняется тем, что здесь проходит Пшехско-Адлерская поперечная зона разломов. Периодичность землетрясений в 6–7 баллов составляет 35–40 лет. С ними связывают повторяемость крупных оползней.

В последние годы в результате строительства вблизи берегов различных сооружений к естественным факторам оползнеобразования добавились искусственные, что в целом привело к активизации экзогенных процессов на склонах.

Ухудшение обстановки на участке у г. Усть-Лабинска было вызвано разработкой земснарядами руслового аллювия, прокладкой параллельно бровке склона автодороги для большегрузных автомобилей и траншеи глубиной до 2 м для газопровода. Траншея сыграла роль первичной трещины отрыва при возникновении оползня в 1979 г. Импульсом, приведшим к крупным оползневым подвижкам, была аварийная утечка при опробовании, построенных без учета особенностей лессовидных грунтов, городских очистных сооружений. В комплекс входят, например, биологические пруды, дно которых было выполнено без всякого покрытия, в результате чего происходила свободная инфильтрация в грунт.

В период с января по сентябрь 1979 г. через очистные сооружения проходило до 2,5 тыс. м<sup>3</sup> в сутки фекальных вод, причем через биопруды вся вода, попадавшая туда, поглощалась грунтом и лишь в сентябре был зафиксирован сток очистных вод р. Кубань.

По ориентировочным расчетам за это время объем фильтрата составил около 600 тыс. м<sup>3</sup> воды. В результате в лессовидных суглинках на глубинах 3–9 м сформировался техногенный водоносный горизонт. Радиус ореала замачивания вокруг очистных сооружений составил 180–220 м. Водоносный горизонт выклинивался по кровле пестроцветных глин. Развился процесс суффозии из песчаных прослоев, залегающих в подошве лессовидных пород. Первые крупные оползневые подвижки отмечены 10 марта 1979 г., т.е. спустя два месяца после пуска очистных сооружений. К декабрю 1979 г.

оползнем был охвачен участок склона шириной 600-700 м, бровка склона сместилась на 30–40 м, а образовавшиеся в подошве валы выпирания выдвинулись в русло р. Кубань на 60–70 м. Длина оползня порядка 120 м, мощность смещенных пород 15–20 м, объем оползня около 1,3 млн м<sup>3</sup>.

В пределах территории города Краснодара помимо глубинной эрозии русла существенное влияние на устойчивость берегов оказывают плановые деформации, выражающиеся в смещении излучины вниз по течению реки (скорость смещения вершин излучины 8–10 м в год, местами до 15–20 м в год), а также в постоянном расширении русла параллельно с углублением дна (скорость отступления бровки берега до 5–8 м в год).

По анализу топографических съемок 1977–78 гг. и 1957–58 гг. общие потери городской территории составили около 60 га на правом берегу, с образованием около 25 га территорий на левом берегу.

Изменение режима работы реки Кубани, включая и появление глиссирующего речного транспорта, привели к более интенсивному размыву берегов. Однако, выделить абсолютное увеличение темпов размыва за прошедшие годы не представляется возможным. Обрушению и размыву подвержены оба берега реки на всем протяжении от водохранилищ до станицы Елизаветинской. Возникла угроза смыва жилых строений рядом с западным жилым районом, нарушения устойчивости мостовых опор железнодорожного и автомобильного мостов и размыва территории промышленных предприятий (КРЭС, кожзавода, фабрики мехов и стеклозавода).

Неразработанность разделов проекта водохранилища по инженерной подготовке территории и защиты города Краснодара от ударной прорывной волны уже привели к нецелесообразности освоения более 860 га территории, предусмотренных генеральным планом городской застройки. И в связи с отказом в развитии города на левом берегу поставлен ряд исключительно сложных и дорогостоящих проблем по инженерному оборудованию, по изъятию ценных земель исследовательских институтов.

Особенности механизма оползней в лессовых породах определяют необходимость создания специальных расчетных схем для анализа первой стадии процесса, когда происходит отделения блоков с их оседанием. Был предложен метод, в котором склон, сложенный лессами подстилаемыми ослабленным на концевом участке

слоем, рассматривался как консольная балка-стенка, нагруженная собственным весом и реакцией основания (Шадунц, 1972). При приближенном расчете для определения ширины отдельного блока может быть использовано решение задачи пластичного изгиба консоли и задачи Прандтля о сжатии пластичной массы между шероховатыми плитами [1,2].

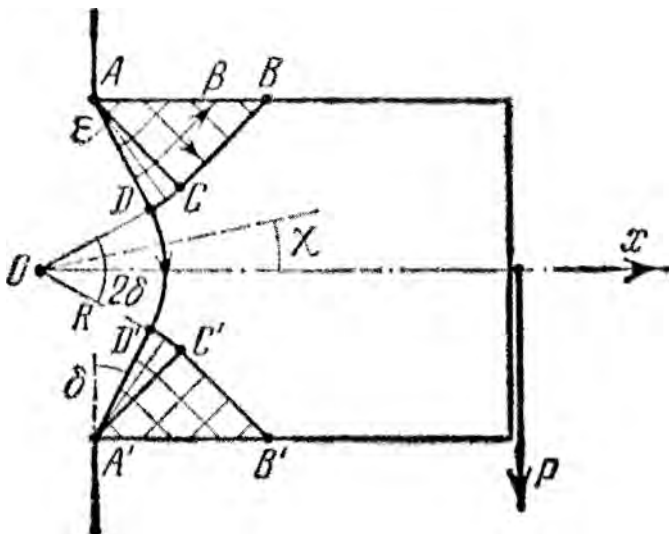


Рис. 2. Второй тип поля скольжения

Уравнение моментов относительно точки вращения консоли (рис. 2).

$$K_1 dR + 0,5\sigma_1 d^2 + K_1 \delta R^2 = 0,5Pl' \quad (1)$$

после ряда подстановок и преобразований приводится к виду:

$$0,25Pl + 0,388 \frac{P^2}{K_1} - 0,438Ph = 1,004K_1 h_1 \quad (2)$$

где  $K_1$  – среднее значение силы сопротивления сдвигу в лессовидных суглинках по линии А-А,  $\sigma_1 = K_1(1 + 2\varepsilon)$ ;  $d, R, l, \delta, e, h, l$  обозначены на рис. 3. Как показано в работе Л.М. Качанова (1969) [3].

$$\delta = 36^\circ 50', \quad a \quad 2\varepsilon = 16^\circ 20'$$

Приближенно  $P$  – суммарная сила, действующая на консоль, принята равной  $P_1 - P_2$  где в плоской задаче  $P_1 = \rho hl$  вес оползневых блока,  $P_2 = K_2 l \left( \frac{l}{h} + \pi \right)$  – предельное сжимающее усилие, необходимое, в соответствии с решением задачи Прандтля, для выдавливания тонкого пластичного слоя.  $K_2$  – среднее значение силы сопротивления сдвигу в слое.

После подстановки значений  $P_1$  и  $P_2$  в уравнении (2) оно может быть решено относительно  $l$ , если необходимо выяснить величину оползневых блоков или ту глубину, до которой должно произойти расслабление слоя глинистого грунта, чтобы произошел срыв. Если по натурным измерениям известна величина  $l$ , то можно решить уравнение (2) относительно величин  $K_1$  и  $K_2$  в целях прогноза оползневых смещений при уменьшении прочностных показателей во времени.

Например, при определении  $l$  решение имеет вид уравнения четвертой степени

$$al^4 + bl^3cl^2 + dl + e = 0 \quad (3)$$

где

$$a = 0,388 \frac{K_2^2}{K_1 h^2}; \quad b = \left[ 0,776 \frac{K_2}{K_1 h} (3,14 K_2 - \rho h) - 0,25 \frac{K_2}{h} \right]$$

$$c = \left[ 0,25 \rho h - 0,347 K_2 + \frac{0,388}{K_1} (\rho^2 h^2 - 6,28 h K_2 + 9,85 K_2^2) \right]$$

$$d = 0,438 (3,14 K_2 - \rho h); \quad e = -1,004 K_1 h^2$$

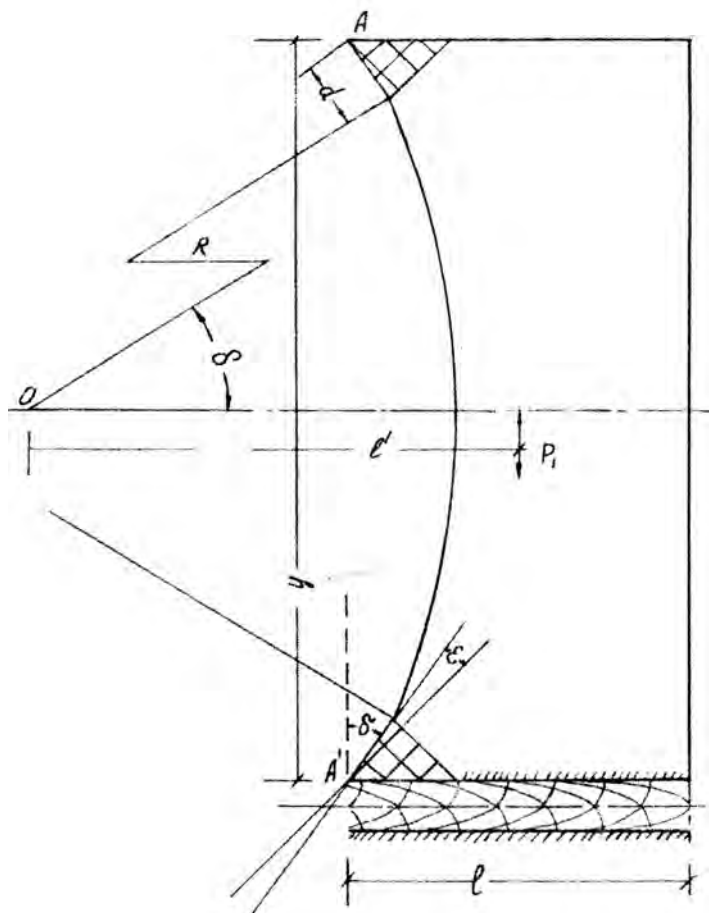


Рис. 3. Поле линий скольжения при изгибе консоли и сжатии пластического слоя малой толщины:

$d$  – длина линии скольжения в треугольной области;  $R$  – радиус дуги скольжения;  $2\delta$  – угол раствора дуги;  $l$  – вылет консоли;  $h$  – высота консоли;  $l'$  – расстояние от центра дуги до линии действия силы веса консоли;  $e$  – угол, ограничивающий центрированные участки поля линий скольжения

Найдя значение коэффициентов, дальнейшие вычисления можно выполнять по одному из известных методов. Так, при значениях  $h = 25$  м,  $c = 1,65$  т/м<sup>3</sup>;  $K_1 = 2,04$  т/м<sup>2</sup> и  $K_2 = 3$  т/м<sup>2</sup>, определенных на ос-



новании результатов лабораторных испытаний образцов грунта с рассматриваемого оползневого участка, решение уравнения (3) на ЭВМ дало значение  $l=3,6$  м (наименьшее из положительных значений корней). Эта величина хорошо согласуется с данными натуральных наблюдений о размерах оползневых блоков. В расчетах для глин пластического слоя  $K_2$  приравнено  $c$ , а для лессовидных суглинков

$$K_1 = c + \frac{\rho h}{2} \operatorname{tg}^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi \quad (4)$$

Значения  $c$  и  $\varphi$  получены по методу быстрого сдвига по подготовленной поверхности.

Расчет откоса по жесткопластичной модели может быть применен при определенных условиях: допускается неизменность механических свойств лессовидных суглинков по высоте слоя, принимается существование в основании консоли тонкого протяженного пластического слоя, имеющего жесткую нижнюю границу, допускается равномерное распределение давления на границах этого слоя.

Рассмотренное нами решение задачи методом конечных элементов является попыткой приблизить расчетную модель к объекту исследования. Вертикальный откос представлен здесь балкой-стенкой, жестко прикрепленной к массиву грунта и стоящей на жестком основании. Расчет напряженного состояния откоса от действия сил тяжести проведен с разбиением области определения на прямоугольные элементы, работающие в условиях плоской деформации.

Определим реакции, возникшие в опорных связях в угловых точках элемента от действия его собственного веса  $P$ . Естественно предположить, что вертикальные составляющие этих реакций одинаковы во всех четырех точках.

Очевидно также, что горизонтальные составляющие реакций, появляющиеся в результате поперечных (в направлении оси  $u$ ) деформаций элемента, также равны между собой и образуют на вертикальных краях элемента пары сил, препятствующих указанным деформациям элемента.

Из уравнения равновесия полости шириной  $dx$  следует:

$$\sigma_v = \rho v \quad (5)$$

где  $c$  – объемная масса материала элемента.

Горизонтальные составляющие реакций при условии сохранения гипотезы плоских сечений вызывают появление на вертикальных краях элемента напряжений

$$\sigma_u = Hb12v. \quad (6)$$

Тогда деформации полоски могут быть определены с помощью формулы обобщенного закона Гука:

$$\varepsilon_u = \frac{1}{E}(\sigma_u - \mu\sigma_v) = \frac{1}{E\delta} \left( \frac{12H}{b} - \mu \frac{P}{a} \right) \frac{v}{b}, \quad (7)$$

где  $E$  – модуль деформации,

$\mu$  – коэффициент Пуассона,

$$m = b/a$$

При  $x = \pm b/2$  деформация элемента в направлении  $u$  невозможна при наличии опорных закреплений.

Отсюда

$$H = \mu \frac{Pm}{12} \quad (8)$$

В задаче использованы два типоразмера элементов: элементы А-К с соотношением размеров  $m = 2,5$  и элементы Л-П с  $m = 1,0$ . Модули деформации приняты следующие:  $E_A = E_B = 11,0$  МПа,  $E_B = E_G = 15,5$  МПа,  $E_D = E_E = 20,0$  МПа,  $E_J = E_3 = E_{И} = E_K = 12,5$  МПа,  $E_L = E_H = 22,0$  МПа,  $E_M = E_{П} = 7,0$  МПа.

Коэффициенты Пуассона  $\mu_{А-К} = 0,05$ ,  $\mu_{Л-П} = 0,45$ .

Перемещения узлов элементов получены из разрешающей системы уравнения

$$[E_1] \{ [K] \{ q \} - (R) \} = 0 \quad (9)$$

где  $[K]$  – матрица жесткости системы элементов,

(R) – вектор узловых сил,

$[E_i]$  – единичная матрица, учитывающая условия закрепления узлов.

Распределение нормальных напряжений согласуется с результатом расчета откоса по жестко-пластической модели по порядку величины шага трещин. Оправданным оказалось предположение о выпирании разуплотненного грунта, подстилающего лессовидные суглинки (элементы Л, М, Н и П).

Существенно новым результатом явилось то, что наибольшие растягивающие напряжения в лессовидных суглинках возникают не на поверхности откоса, а в глубине массива, то есть трещины отрыва могут образоваться внутри откоса и лишь вследствие перераспределения напряжений выйти на поверхность.

Ограниченность этой модели откоса в том, что точность расчета зависит от степени разбиения расчетной области на элементы, а значит, и от точности задания механических характеристик грунтов. Кроме того, задача рассмотрена в линейной постановке, без учета нелинейности деформационной характеристики грунтов и пластических свойств.

Оба предложенных расчета, построенные на одних и тех же предпосылках, дают сходные результаты и, по-видимому, верно отражают механизм разрушения вертикальных откосов, опирающихся на сильно сжимаемый слой грунта. Следует поэтому рекомендовать защиту сложенного размокающими и выветриваемыми породами основания таких откосов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадунц, К.Ш. О механизме оползней правобережья р. Кубань / К.Ш. Шадунц // Современные геологические процессы и строительство: сб. трудов ПНИИС. – М., 1972. – Т. XVI. – С. 114–122.
2. Шадунц, К.Ш. Устойчивость вертикального откоса в лессовидных суглинках / К.Ш. Шадунц, П.А. Ляшенко // Проектирование и строительство сельскохозяйственных зданий и сооружений: труды КСХИ, Краснодар, 1978. – Вып. 167. – С. 23–31.
3. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов. – М.: Изд-во Наука, 1969.