

УДК: 551.3; 624.13

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЕОПАСНОГО МАССИВА И СМЕЩЕНИЯ ОПОЛЗНЕВОГО БЛОКА

© 2019 г. Г. П. Постоев

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия  
E-mail: opolzen@geoenv.ru*

Поступила в редакцию 11.09.2018 г.

В оползневом цикле развития глубоких блоковых подвижек начало оползневого процесса обусловлено отделением от коренного массива нового оползневого блока, а завершение — его смещением до образования на оползневом склоне установившейся ровной оползневой террасы. Исходное напряженное состояние в коренном массиве с горизонтальной дневной поверхностью (до образования оползневого блока) регламентируется законом Кулона-Мора. Появление оползневого очага и возникновение базиса оползания вызывают преобразование исходного напряженного состояния и возникновение в массиве горизонтально расположенных диссипативных структур-блоков, по граничным поверхностям (круглоцилиндрического очертания) которых происходит концентрация главных напряжений. В локальной зоне массива по граничным поверхностям соответствующего блока формируется предельное состояние и по ним же происходит его смещение при нарушении равновесия. При формировании предельного состояния массива надоползневого уступа прилегающая часть оползневого массива (в границах ранее отделившегося оползневого блока) играет роль пригрузки (создает активное вертикальное давление от веса оползневых масс) на горизонт базиса оползания. Имеет место взаимодействие коренного массива (на этапе подготовки смещения блока) и оползневого склона. Предельное состояние блока наступает, когда высота надоползневого уступа достигает критического значения (превышение бровки склона над оползневой террасой).

В статье рассматриваются условия образования нового оползневого блока, его перехода в режим смещения, механизм взаимодействия блока с коренным массивом и телом оползня, состоящим из ранее сместившихся блоков; дается обоснование изменения прочности грунтов в процессе смещения и ее значение в завершении оползневого цикла; сопоставлены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

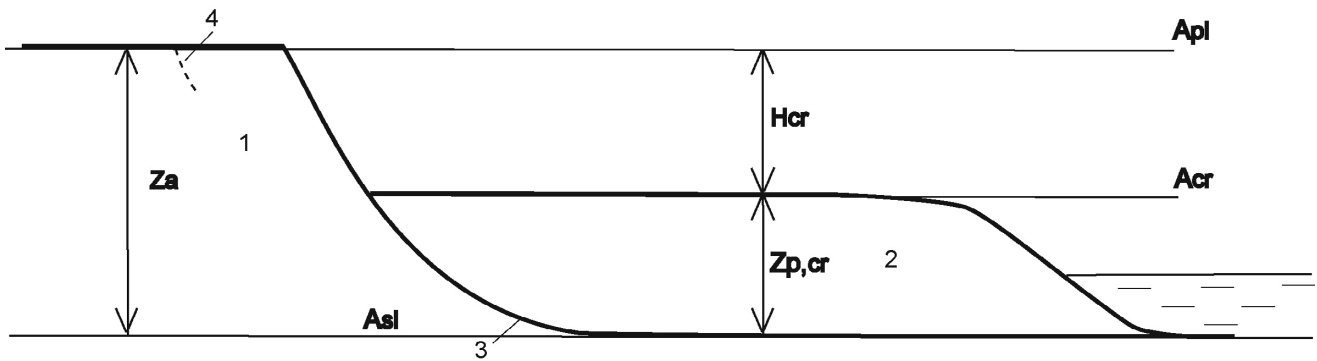
**Ключевые слова:** *оползневой цикл, коренной массив, оползневой блок, оползневая терраса, зона смещения, поле напряжений, закон Кулона-Мора, диссипативные структуры, предельное состояние, прочность грунтов.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019213-20>

### ВВЕДЕНИЕ

Глубокие блоковые оползни типа сжатия-выдавливания [9] имеют достаточно сложный механизм формирования и развития. Это связано с образованием массивных оползневых блоков, которые отделяются от коренного массива и оседают по крутой криволинейной поверхности смещения, переходящей в нижней части в почти горизонтальную. Существование блоковой структуры оползневого массива нередко пытаются увязывать с исходной тектонической нарушением массива, наличием соответствующих

линеаментов и шовных зон [6, 14]. Образование почти горизонтальной поверхности смещения оползневого массива объясняют литологическим строением с горизонтальным залеганием слоев и/или наличием слабого слоя в коренном массиве [2, 5, 7, 8]. При анализе оползневого процесса на откосах карьеров также иногда выявляют унаследованную поверхность скольжения при развитии в прошлом древних оползней [3]. Есть попытки выделения (по механизму движения) отдельно оползня срезания-сдвига (процесс отделения блока от краевой части плато и его смеще-



**Рис. 1.** Схематический разрез оползневой массы на заключительном этапе оползневой цикла развития глубокого оползня сжатия-выдавливания: 1 – коренной массив; 2 – оползневой массив; 3 – поверхность скольжения; 4 – трещина закола нового оползневой блока (начало нового оползневой цикла);  $A_{pl}$ ,  $A_{cr}$ ,  $A_{sl}$  – уровни плато, оползневой террасы и поверхности скольжения (базиса оползания).

ние по криволинейной поверхности смещения) и скольжения-течения (перемещение оползневой массы, состоящего из ранее смещенных частично разрушенных блоков). В частности, такое мнение высказывал И.О. Тихвинский по таким участкам, как оползень на альбском откосе Волжского склона на северо-восточной окраине г. Ульяновска, оползни Свяжского склона в том же городе; Соколова гора в Саратове; оползень волжского склона близ Нижнего Новгорода [13]. Подобные суждения были и по блоковым оползням на участке Лагерный сад (г. Томск), а также по оползневому участку на береговом склоне р. Пехорки (г. Железнодорожный). При этом забывается о целостности процесса развития деформаций массива в течение оползневой цикла и о возможном искажении механизма и причин подготовки оползневых блоков соответствующих размеров.

С другой стороны, необходимо отметить, что большое разнообразие проявлений блоковых оползней сжатия-выдавливания, в том числе во взаимодействии с оползнями других типов, может вызвать затруднения в распознавании основного механизма формирования глубокого оползня и выявлении особенностей его развития в конкретных условиях. Между тем определение типа оползня, проявление которого связано с развитием глубоких подвижек крупных массивов, предусматривает необходимость учета ряда закономерностей деформирования грунтовых массивов, которые рассматриваются ниже.

### ОПОЛЗНЕВОЙ ЦИКЛ И ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ ГЛУБОКОГО БЛОКОВОГО ОПОЛЗНЯ

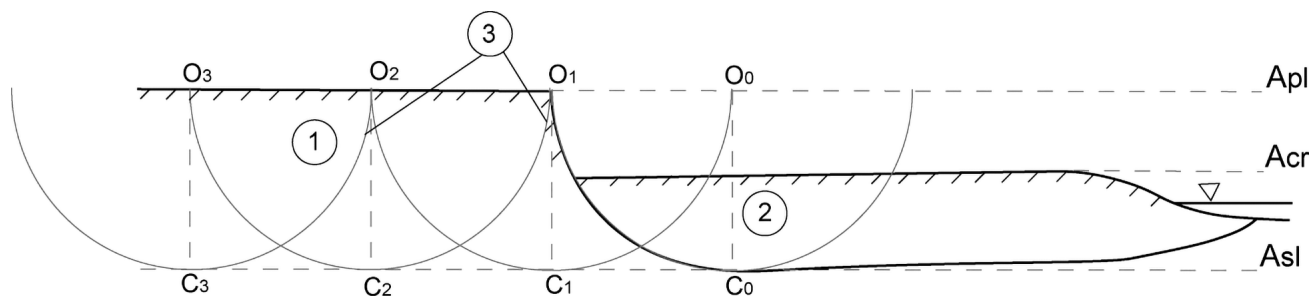
В развитии оползневой массы, в частности блоковых оползней сжатия-выдавливания, выделяются характерные периоды (стадии и фазы)

в течение оползневой цикла. Оползневой цикл развития блокового оползня занимает время от начала образования оползневой массы и его отделения от коренного массива краевой части плато (фаза катастрофических смещений) до его полного оседания и перемещения с оползневой массой (оползневой массивом, состоящим из ранее отделившихся от плато блоков). На заключительном этапе подвижек блоков образуется относительно ровная оползневая терраса (фаза затухания смещений, когда оползневые блоки создают на склоне единую ступень). В рельефе террасы могут иметь место ряды валов выпора по фронтальным границам оползневых блоков или бугры сжатия, но и в этих случаях выделяется уровень оседания оползневых блоков в завершении цикла. При этом возникает критическая ситуация по устойчивости коренного массива надоползневой уступа (рис. 1). Высота откоса уступа  $H_{cr}$  достигает критического значения по условию устойчивости подготовленного к оползанию блока в коренном массиве. Из рассмотрения напряженно-деформированного состояния оползнеопасного массива получено уравнение (1), определяющее предельное равновесие сил перед образованием оползневой массы по центральному створу оползневой очага [10]:

$$\gamma_i Z_{ai} - \sigma_{str,i} = \frac{\pi}{2} \gamma_i Z_{p,cr}, \quad (1)$$

$$H_{cr} = Z_a - Z_{p,cr}, \quad (2)$$

где  $\gamma_i$  – среднее значение удельного веса грунтов, залегающих над  $i$ -м горизонтом (уровнем  $A_{sl}$ ) в оползнеопасном коренном массиве (см. рис. 1);  $Z_{a,i}$  – глубина до горизонта  $A_{sl}$  в коренном массиве;  $\sigma_{str,i}$  – структурная прочность грунта на горизонте  $A_{sl}$  коренного массива;  $Z_{p,cr}$  – критическая (расчетная) глубина до деформирующегося горизонта  $A_{sl}$



**Рис. 2.** Схематический разрез оползневой структуры в грунтовом массиве: 1 — коренной массив; 2 — оползневой массив; 3 — границы блоков-диссипативных структур;  $A_{pl}$ ,  $A_{cr}$ ,  $A_{sl}$  — уровни плато, оползневой террасы и поверхности скольжения.

в массиве оползневых отложений, пригружающих откос коренного массива надоползневого уступа;  $a$  и  $p$  — индексы, характеризующие соответственно зоны формирования активного и относительно пассивного горизонтальных давлений на горизонте базиса оползания.

Возникает предельное состояние в указанном массиве, проявляется трещина закола, и формируется поверхность скольжения нового оползневой блока. Базис оползания устанавливается при образовании первого оползневой блока (начальное проявление оползневой процесса на участке) и сохраняется при образовании последующих блоков, составляющих оползневой массив.

Коренной массив на удалении от склона (т.е. при отсутствии влияния внешнего силового воздействия на массив) можно считать относительно равновесной системой. На горизонтах массива, где вертикальное давление  $\sigma_{li} = \gamma Z_i$  от веса вышележащей толщи грунта превышает структурную прочность грунта  $\sigma_{str,i}$  (предельное давление на грунт при одноосном сжатии) возникают нормальные друг к другу горизонтальные главные напряжения распора  $\sigma_{3i} = \sigma_{2i} = (\sigma_{li} - \sigma_{str,i}) \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$ .

Равновесие в точке соблюдается, когда напряжения распора противостоят равные им напряжения отпора. Эти соотношения вытекают из закона Кулона-Мора [9]:

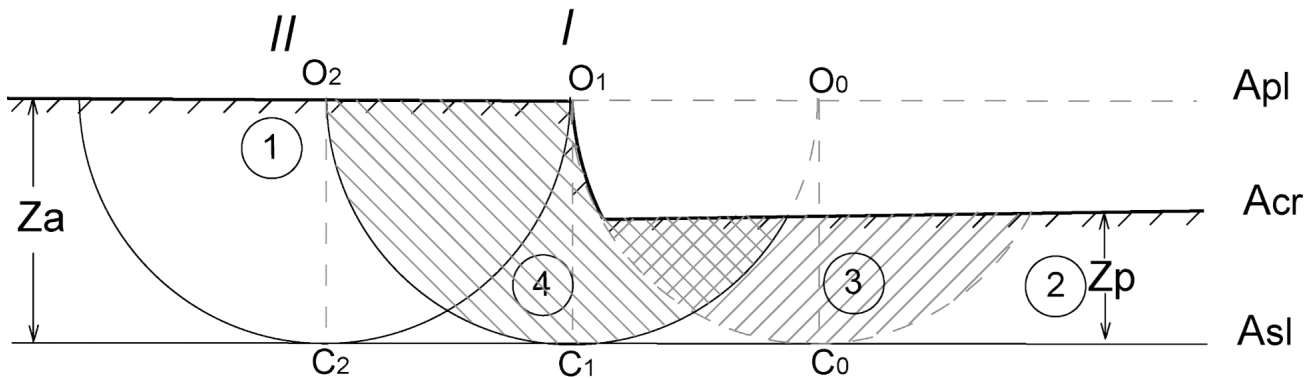
$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2). \quad (3)$$

Развитие смещений грунтовых масс в оползневой очаге оказывает влияние на состояние коренного массива в прибровочной части оползневой структуры. В соответствии с теорией диссипативных структур И. Пригожина [12] и исследованием механизма формирования оползневых блоков [10, 11] блочная структура массива (в зоне влияния

оползневой очага) проявляется в преобразовании исходного напряженного состояния.

Вероятно, блоки как диссипативные структуры [11, 12] образуются в поле напряжений оползневой неопасной массива уже на начальном этапе развития оползневой процесса на участке. Влияние оползневой очага можно рассматривать как внешнее локальное силовое возмущение, вызывающее разгрузку горизонтальных напряжений отпора со стороны склона на уровне базиса оползания, противодействующих активным горизонтальным напряжениям распора в прилегающем к склону коренном массиве. В коренном массиве происходит перестройка исходного напряженного состояния в прилегающей к оползневой очагу зоне с образованием диссипативных структур в виде блоков-полуцилиндров.

Внутри блока в коренном массиве сохраняются исходное геологическое строение, свойства и гидрогеологические условия грунтов, равновесие в точке (в условиях сжатия в соответствии с критерием Кулона-Мора). По граничным круглоцилиндрическим поверхностям (оболочкам) блока происходит концентрация главных меридиональных (вертикальных) и широтных (горизонтальных) напряжений, при этом их значения могут в 10 и более раз превышать распорное давление в точках грунтового массива внутри блока в соответствии с теорией тонкостенных осесимметричных оболочек, а внешнее давление равно нулю [11]. Каждый из блоков в нижней точке по центральному сечению (рис. 2) находится в грунтах потенциально деформируемого горизонта  $A_{sl}$  — базиса оползания (в соответствии с исходными инженерно-геологическими характеристиками массива и параметрами оползня). Распространение в массиве диссипативных структур в виде блоков-полуцилиндров происходит подобно волнам в водной среде. При этом длина волны (радиус круглоцилиндрической поверхности) равен глубине  $Z_a$ , т.е. центры круговых сечений блоков



**Рис. 3.** Схема к выводу уравнения предельного равновесия оползнеопасного массива надоползневого уступа при формировании нового оползневого блока: 1 – коренной массив; 2 – оползневой массив; 3 – смещенный оползневой блок с дневной поверхностью на уровне оползневой террасы в завершении оползневого цикла; 4 – блок I в массиве надоползневого уступа коренного массива по контакту с оползневой террасой.

отстоят друг от друга с шагом  $Z_a$  (см. рис. 2), обуславливая сложную структуру поля напряжений в коренном массиве, прилегающем к бровке оползневого очага [11].

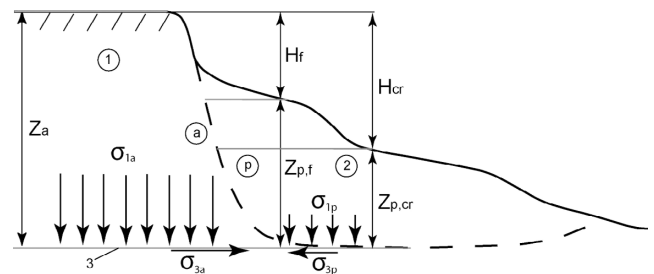
### ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ОТДЕЛЕНИЯ И ДВИЖЕНИЯ НОВОГО ОПОЛЗНЕВОГО БЛОКА

Условие равновесия между оползневой блоком и блоком надоползневого уступа (с границами в напряжениях) в коренном массиве с учетом центрального створа очага, т.е. наличия коэффициента  $\pi/2$ , имеет вид уравнения (1), или с учетом  $Z_{p,cr} = Z_a - H_{cr}$ , получим:

$$Z_a - \frac{\sigma_{str}}{\gamma} = \frac{\pi}{2} Z_{p,cr}. \quad (4)$$

Подготовка нового оползневого блока проходит в соответствии с процессами, происходящими во фронтальной его части, которая частично уже захвачена оползневой процессом (рис. 3). Площадка  $O_0O_1$  в процессе образования оползневого блока 3 опускается от уровня плато  $A_{pl}$  до критического значения оползневой террасы  $A_{cr}$ . При этом тыловая часть блока находится в коренном залегании до тех пор, пока не будет достигнуто предельное состояние в оболочке блока – в нижней, наиболее нагруженной точке  $C_1$  на горизонте  $A_{sl}$ , где в первую очередь происходит разгрузка горизонтальных напряжений. В предельном состоянии имеет место равновесие между блоками 3 и 4 (см. рис. 3), в соответствии с (4). Разрушительные деформации грунтового массива на начальном этапе нарушения равновесия блока концентрируются в узких границах его оболочки. Блок отделяется по всей вероятности одновременно от низа до верха по тыловой его границе (оболочке). При этом пре-

дельное состояние в первую очередь достигается и нарушается в нижней части блока. Внутри блока распорное давление в грунтовой массе снижается, и смещение грунтов блока происходит под собственным весом в режиме одноосного сжатия при отсутствии сцепления по границам блока, где имеет место разрыв сплошности грунтовой среды. Соответственно при оседании блока верхние грунтовые слои в основном сохраняют свою исходную структуру, а грунты нижних горизонтов раздавливаются с образованием валов сжатия-выдавливания на участке контакта с оползневой террасой, что отмечается на многих разрезах оползневых склонов [4, 7, 11]. Интенсивность смещения нового блока зависит от взаимодействия с тыловой частью оползневой террасы, сил трения по образовавшейся поверхности скольжения (разрыву сплошности по граничной поверхности блока),



**Рис. 4.** Схема к расчету устойчивости коренного массива в зоне формирования нового оползневого блока: 1 – оползнеопасный коренной грунтовой массив (зона «а»); 2 – оползневое тело смещенных грунтов (зона «р»); 3 – рассматриваемый деформирующийся горизонт грунта (на уровне поверхности скольжения оползня) с характеристиками  $\phi$ ,  $c$  и  $\sigma_{str}$ ;  $\sigma_{1a}$  и  $\sigma_{3p}$  – значения бытового давления соответственно в коренном массиве и теле оползня у стенки срыва;  $H_{cr}$  – критическое значение высоты стенки срыва, определяемое по (1).

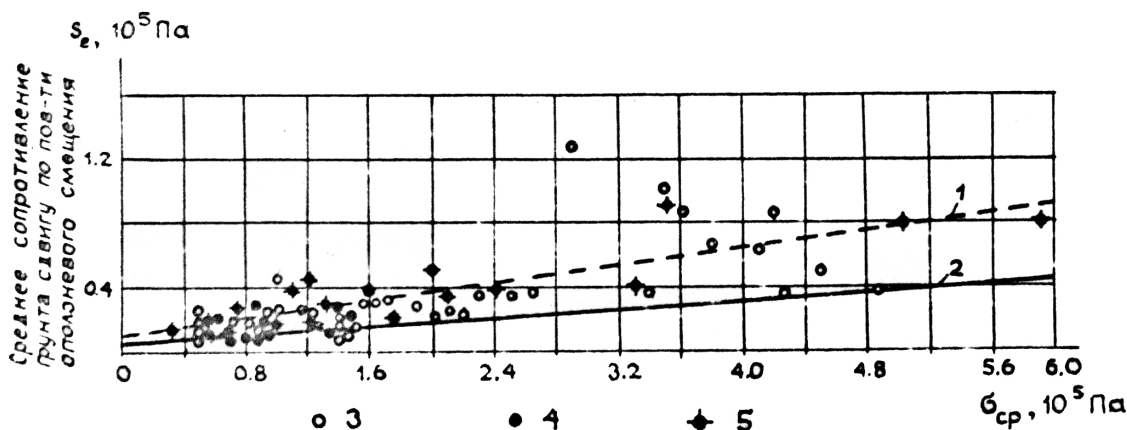


Рис. 5. Среднее сопротивление сдвигу по поверхности скольжения оползней в глинистых грунтах, по А.Е. Туровской [15]: 1 – график остаточной прочности по данным лабораторных испытаний  $S_{ocm} = 9 + 0.14\sigma$ ; 2 – график остаточной прочности по данным обратных расчетов для природных оползней  $S_{e,ocm} = 4 + 0.07\sigma$ ; оползни: 3 – в пластичных глинах; 4 – в жестких глинах; 5 – в полускальных породах.

в том числе с учетом влияния изменившихся инженерно-геологических и гидрогеологических условий. Величина проседания отделившихся блоков в начальный период оползневого смещения может составлять десятки метров [3, 11, 13].

После отделения от коренного массива новый оползневой блок (блок 4, см. рис. 3) приобретает новое качество. Блок оседает и оказывает активное давление на тыловую часть оползневого массива (блок 3, см. рис. 3), осуществляя детрузивный (толкающий) механизм смещения оползневых масс. Перед блоком в деформирующемся грунте, особенно в зоне нижней части блока (в районе базиса оползания), образуются, как указывалось выше, валы выпирания, которые нередко достигают поверхности оползневого массива. При этом оползневой массив мощностью  $Z_p$  оказывает пассивное сопротивление активному давлению нового блока (рис. 4).

В предельном состоянии между горизонтальными напряжениями в точках  $C_0$  и  $C_1$  блоков 3 и 4 (см. рис. 3) соблюдается равновесие:

$$\sigma_{3a} = \frac{\pi}{2} \sigma_{3p,cr}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{3a}$  и  $\sigma_{3p,cr}$  – горизонтальные главные напряжения на горизонте базиса оползания на этапе предельного состояния массива надоползневого уступа.

После отделения блока и его превращения в часть оползневого массива в условии (4) блок 4 приобретает индекс ( $p$ ). На горизонте  $A_{sl}$  (глубина  $Z_{p,f}$ , см. рис. 4) условие текущего равновесия горизонтальных главных напряжений на  $i$ -й момент времени, когда высота надоползневого уступа составит  $H_f = H_{cr}$ , в соответствии с изложенным выше, будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\pi}{2} \sigma_{3p,f} = \sigma_{3p,cr}, \quad (6)$$

или через вертикальные напряжения  $\sigma_{1p,f} = \gamma Z_{p,f}$ :

$$\frac{\pi}{2} \gamma Z_{p,f} \operatorname{tg}^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{\gamma Z_{p,cr}}{\operatorname{tg}^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right)}, \quad (7)$$

где  $Z_{p,f}$  – текущее значение высоты блока над плоскостью скольжения (основным деформирующимся горизонтом).

В выражении (7) учтено, что, оседая, новый оползневой блок оказывает активное вертикальное давление на грунты зоны смещения. В процессе смещения мощность блока  $Z_{p,f}$  постепенно снижается. При этом на горизонте  $A_{sl}$  возникают горизонтальные напряжения распора  $\sigma_{3p,f}$ . Оползневой массив мощностью  $Z_{p,cr}$  оказывает пассивное сопротивление, создавая отпор  $\sigma_{3p,cr}$  путем преодоления веса оползневых масс. В данном соотношении напряжений наибольшим (в критерии Кулона-Мора) является горизонтальное напряжение  $\sigma_{3p,cr}$ , а наименьшим – вертикальное давление от веса оползневых масс  $\gamma Z_{p,cr}$ .

Из (7) можно определить условия, при которых дневная поверхность нового оползневого блока достигнет критического уровня оползневой террасы  $A_{cr}$ :

$$Z_{p,f} = Z_{p,cr}, \text{ когда } \frac{\pi}{2} = \frac{1}{\operatorname{tg}^4 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right)}. \quad (8)$$

Условие (8) означает, что в процессе смещения исследуемого оползневого блока происходит снижение угла внутреннего трения до некоторого установившегося критического значения (при раздавливании грунтов зоны смещения и сдвигения блока по образованной поверхности скольжения), величина которого не зависит от исходной прочности и генетических особенностей грунта на данном горизонте.

**На основании (8) в соответствии с теоретическими расчетами:**

$$\varphi_{cr} = 6^{\circ}28' \quad (9)$$

Когда площадка блока сравнивается с установившимся уровнем  $A_{cr}$  оползневой террасы, высота надоползневого уступа составит  $H_{cr}$  (см. рис. 1, рис. 4).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА В ЗОНЕ СМЕЩЕНИЯ ОПОЛЗНЕВОГО МАССИВА

В Днепропетровском институте железнодорожного транспорта в 1960-1970 гг. были проведены обширные исследования прочности глинистых грунтов в зоне смещения оползней [1]. Проводились лабораторные испытания сдвиговой прочности грунтов, физическое моделирование склонов и обратные расчеты (рис. 5).

По мнению А.Я. Туровской, выявленный разброс значений сопротивления сдвигу, полученных обратным расчетом по существующим 90 оползням (см. рис. 5), объясняется в значительной мере тем, что исследованные оползневые склоны находились на различных этапах развития, и поэтому сопротивление сдвигу по поверхности скольжения могло колебаться между пиковым и остаточным значениями. Установлено, что снижение сопротивления сдвигу по поверхности скольжения не завершается за один этап подвижки, а продолжается в течение нескольких периодов смещений. В результате в зоне смещения происходит ориентация частиц вдоль поверхности смещения с формированием соответствующего слоя, образуется своеобразная прослойка, которая за счет подтягивания влаги создает эффект автосмазки. Таким образом, сопротивление сдвигу снижается до остаточного значения, которое не зависит от первоначальной прочности грунта [15].

**В соответствии с результатами экспериментальных исследований школы М.Н. Гольдштейна, угол внутреннего трения сопротивления сдвигу по поверхности скольжения оползневых массивов находится в интервале значений  $4 \div 4.5^{\circ} - 8 \div 8.5^{\circ}$ , что хорошо согласуется с предложенными теоретическими расчетами ( $\varphi_{cr} = 6^{\circ}28'$ ).**

### ВЫВОДЫ

В поле напряжений коренного массива под влиянием оползневого очага образуются полуцилиндрические диссипативные структуры между горизонтом базиса оползания и дневной поверхностью массива. Формирование предельного состояния массива надоползневого уступа и образование оползневого блока происходят по граничным круглоцилиндрическим поверхностям диссипативных структур.

При формировании предельного состояния массива надоползневого уступа оползневой массой (в границах ранее отделившегося оползневого блока) создает пригрузку (активное вертикальное давление от веса оползневых масс) на горизонт базиса оползания, определяя взаимодействие оползневого массива и блока в поле напряжений коренного залегания грунтов.

Под весом грунтовых масс в оползневом блоке, отделившемся от коренного массива, в процессе его оседания происходит раздавливание и смятие грунтов в зоне базиса оползания. Сопротивление смещению оползневого блока по граничной поверхности, согласно теоретическим расчетам, зависит от величин угла внутреннего трения грунта, которые снижаются в процессе деформирования, и от пассивного сопротивления со стороны массива оползневой террасы. В уравнении равновесия горизонтальное давление блока по поверхности оползневого скольжения является наибольшим главным напряжением (распора, отпора), а вертикальное давление в оползневом массиве на этот горизонт — наименьшим.

Смещение блока и соответственно проявление давления от него на массив оползневой террасы происходят до тех пор, пока дневная поверхность блока не сравнивается с установившимся уровнем оползневой террасы, определяя завершение оползневого цикла.

Расчеты по предложенным уравнениям, определяющим взаимодействие между новым оползневой блоком и массивом оползневой террасы, показали, что на завершающем этапе движения блока угол внутреннего трения грунтов на горизонте базиса оползания (основной горизонтальной поверхности скольжения) достигает значения  $\varphi_{cr} = 6^{\circ}28'$ . Эти данные подтверждаются результатами экспериментальных исследований (лабораторные испытания, физическое моделирование, обратные расчеты), проведенных в 1960-1970 гг. прошлого столетия в Днепропетровском институте железнодорожного транспорта (М.Н. Гольдштейн, А.Я. Туровская и др.). В частности, установлено, что сопротивление сдвигу по поверхности скольжения в результате многократных подвижек

оползня не зависит от исходной прочности грунтов. По экспериментальным данным значение угла внутреннего трения в зоне смещения находится в интервале  $4\div 4.5^\circ - 8\div 8.5^\circ$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн М.Н., Туровская, А.Я. Развитие оползневых смещений в запредельном состоянии // Инженерно-геологические свойства пород и процессы в них. Тр. Междунар. Симпозиума. М.: Изд-во МГУ. Вып. 2. 1973. С. 110-119.
2. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 308 с.
3. Иванов И.П. Инженерно-геологические исследования в горном деле. Л.: Недра, 1987. 255 с.
4. Кротошкин М.П. Природа крупных оползней Москвы и Подмоскovie // Инженерная геология. 2016 №1. С. 4-14.
5. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневого процесса на европейской части СССР и его региональный прогноз. М.: Недра, 1980. 213 с.
6. Макеев В.М., Григорьева С.В. Влияние неотектонических движений на формирование оползневого склона Воробьевых гор г. Москвы // Инженерная геология. 2016. №2. С. 32-38.
7. Науменко П.Н. Условия формирования и инженерно-геологическая характеристика оползней Черноморского побережья Одессы // Оползни Черноморского побережья Украины. М.: Недра, 1977. С. 57-100.
8. Парецкая М.Н. Особенности инженерно-геологических свойств юрских глин и оползни выдавливания Подмоскovie // Тр. ВСЕГИНГЕО. Вып. 40. 1971. М.: ВСЕГИНГЕО, С. 82-87.
9. Постоев Г.П. Уравнения состояния массива при формировании оползней // Инженерная геология. 2010. №4. С. 48-53.
10. Постоев Г.П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.-СПб.: Нестор-История, 2013. 100 с.
11. Постоев Г.П. Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней // Инженерная геология. 2018. Т. XIII. №3. С. 54-64.
12. Пригожин И.Р., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Едиториал УРСС, 2003. 312 с.
13. Тихвинский И.О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 144 с.
14. Тихонов А.В. Научно-методические основы изучения глубоких оползней г. Москвы с применением высокоточных методов. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. геол.-мин. н. М.: РГГУ, 2011. 23 с.

15. Туровская А.Я. Закономерности развития оползневых процессов в зависимости от прочностных и деформационных особенностей глинистых грунтов. Автореф. дисс. д-ра геол.-мин. н. М.: Изд-во МГУ, 1979. 39 с.

## REFERENCES

1. Goldshtein, M.N., Turovskaya, A.Ya. *Razvitiye opolznevyykh smeshchenii v zapredel'nom sostoyanii*. *Inzhenerno-geologicheskie svoistva porod i protsessy v nikh* [Landslide displacements development in the over-limit state. Engineering geological properties of soils and processes therein]. *Trudy Mezhdunarodnogo Simpoziuma* [Proc. Intern. Symposium]. Moscow, MGU Publ., issue 2, 1973, pp. 110-119. (in Russian)
2. Emelyanova, E.P. *Osnovnyye zakonomernosti opolznevyykh protsessov* [Main regularities of landslide process]. Moscow, Nedra, 1972, 308 p. (in Russian)
3. Ivanov, I.P. *Inzhenerno-geologicheskie issledovaniya v gornom dele* [Engineering and geological researches in mining]. Leningrad, Nedra, 1987, 255 p. (in Russian)
4. Kropotkin, M.P. *Priroda krupnykh opolznei Moskvy i Podmoskov'ya* [The origin of large landslides in Moscow and Moscow region]. *Inzhenernaya geologiya*, no.1, 2016, pp. 4-14. (in Russian)
5. Kyuntsel, V.V. *Zakonomernosti opolznevogo protsessa na evropeiskoi chasti SSSR i ego regional'nyi prognoz* [Regularities of the landslide process in the European part of the USSR and its regional forecast]. Moscow, Nedra, 1980, 213 p. (in Russian)
6. Makeev, V.M., Grigorieva, S.V. *Vliyanie neotektonicheskikh dvizhenii na formirovanie opolznevogo sklona Vorob'evykh gor g. Moskvy*. [Neotectonic movements impact on formation of landslide slope of Vorobiev Gory]. *Inzhenernaya geologiya*, 2016, no. 2, pp. 32-38. (in Russian)
7. Naumenko, P.N. *Usloviya formirovaniya i inzhenerno-geologicheskaya kharakteristika opolznei Chernomorskogo poberezh'ya Odessy*. *Opolzni Chernomorskogo poberezh'ya Ukrainy* [Conditions of formation and geotechnical characteristics of landslides on the Black sea along the coast of Odessa. Landslides on the Black sea coast of Ukraine]. Moscow, Nedra, 1977, pp. 57-100. (in Russian)
8. Paretskaya, M. N. *Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh svoistv yurskikh glin i opolzni Podmoskov'ya* [Specifics of engineering geological properties of Jurassic clays and landslides of Moscow region]. Moscow, *Trudy VSEGIN GEO*, issue 40, pp. 82-87. (in Russian)
9. Postoev, G.P. *Uravneniya sostoyaniya massiva pri formirovanii opolznei* [Equations of a massif state during the landslide formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2010, no. 4, pp. 48-53. (in Russian)

10. Postoev, G.P. *Predel'noe sostoyanie i deformatsii gruntov v massive* (opozni, karstovye provaly, osadki gruntovykh osnovanii. [Limit state and soil deformations in a massif (landslides, karst failures, ground settlements)]. Moscow, St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2013, 100 p. (in Russian)
11. Postoev, G. P. *Dissipativnye struktury v gruntovom massive na primere formirovaniya glubokikh opolznei* [Dissipative structures in a soil massif by the example of deep landslides formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, vol. XIII, no. 3., pp. 54–61. (in Russian)
12. Prigogine, I., Stengers, I. *Poryadok iz khaosa* [Order out of chaos]. Moscow, Editorial URSS, 2003. p. 312. (in Russian)
13. Tikhvinsky, I.O. *Otsenka i prognoz ustoichivosti opolznevyykh sklonov* [Evaluation and prediction of stability of landslide slopes]. Moscow, Nauka, 1988, 144 p. (in Russian)
14. Tikhonov, A.V. *Nauchno-metodicheskie osnovy izucheniya glubokikh opolznei g. Moskvy s primeneniem vysokotochnykh metodov* [Scientific methodological foundations of studying deep landslides of Moscow with the application of precision methods]. Extended abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) dissertation, Moscow, RGGU, 2011, 23 p. (in Russian)
15. Turovskaya, A.Ya. *Zakonomernosti razvitiya opolznevyykh protsessov v zavisimosti ot prochnostnykh i deformatsionnykh osobennostei glinistykh gruntov* [Regularities of development of landslide processes depending on strength and deformation characteristics of clayey soils]. Extended abstract of Doctoral Sci. (Geol.-Min.) dissertation, Moscow, MGU Publ., 1979, 39 p. (in Russian)

## MECHANISM SPECIFICS OF THE LANDSLIDE-HAZARDOUS MASSIF LIMIT STATE FORMATION AND LANDSLIDE BLOCK DISPLACEMENT

G. P. Postoev

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: opolzen@geoenv.ru*

In the landslide cycle of deep block movement development, the landslide process starts with the separation of the new landslide block from the bedrock massif, and it ends with the block displacement until the steady landslide head is formed in the hotbed (on the landslide slope). The initial stressed state in the bedrock massif with horizontal earth surface (before the landslide block forms) is controlled by the Mohr-Coulomb criterion. The landslide hotbed forming as well as the sliding basis appearing cause the change in the initial stress state and the formation of horizontally oriented dissipative blocks-structures. The principal stresses are concentrated on the boundary surfaces of these structures (which are of a circular cylindrical shape). The limit state forms along these boundary surfaces of the appropriate block in the local massif zone on the contact with the landslide hotbed. The displacement occurs along the same surfaces, provided the equilibrium is disturbed. In forming the limit state of the head scarp massif, the adjacent part of the landslide massif (within the boundaries of the earlier separated landslide block) acts as an additional load (creates an active vertical pressure from the landslide mass weight) to the horizon of the landslide basis. The bedrock massif interacts with the slope at the stage of preparing block displacement. The block limit state is achieved in case the head scarp height reaches its critical value (the slope edge is higher than the landslide head). Under the soil masses weight in the new landslide block, separated from the bedrock massif, as it subsides, the soil crushes in a lower part of the block, which has lost its balance, in the slide basis zone. The paper considers the conditions of the new landslide block formation, the beginning of block displacement process, the mechanism of interaction between blocks, the bedrock massif and the landslide body, which consists of earlier displaced landslide blocks. The paper also provides the rationale for the soil strength changes in the process of displacement and its significance in the landslide cycle completing, with comparing the results of theoretical and experimental studies.

**Keywords:** *landslide cycle, bedrock massif, stress field, the Mohr-Coulomb criterion, dissipative structures, limit state, landslide block, landslide head, displacement zone, soil strength.*

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019213-20>