

УДК 551.3;624.13

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ НОВОГО ОПОЛЗНЕВОГО БЛОКА

© 2022 г. Г. П. Постоев<sup>1,\*</sup>, А. И. Казеев<sup>1</sup>, М. М. Кучуков<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: opolzen@geoenv.ru

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.

После доработки 23.07.2022 г.

Принята к публикации 27.07.2022 г.

При подготовке в коренном массиве нового оползневого блока возникают диссипативные геологические структуры (ДГС) в соответствии с физико-геологическими закономерностями функционирования геологической среды на участке развития оползневого очага. Отделение блока происходит как отторжение ДГС по ее границе (оболочке) с разрывом структурных связей в грунтах и последующим вращательным смещением ДГС-блока (в пределах оболочки) по образовавшейся поверхности скольжения как оползневого массива. Выполнен анализ сопоставительных расчетов оценки состояния массива при подготовке блока как ДГС и по существующим методам расчета устойчивости (в частности, в программе Geostab). Учет механизма и закономерностей подготовки ДГС-блока при оценке состояния массива позволяет повысить точность и достоверность расчетных процедур.

**Ключевые слова:** диссипативные геологические структуры, напряженно-деформированного состояния, закономерности, критерии, предельное состояние, расчеты, схемы ДГС и сдвига

DOI: 10.31857/S0869780922050071

Образование и смещение нового блока на оползневом участке вызывают разрушительные деформации склона. Размеры блока по фронту могут составлять десятки и сотни метров. Известно, что оползневой участок (очаг) в связи с развитием деформаций осуществляет внешнее воздействие на коренной массив, примыкающий к нему в верхней части склона, вызывая образование в нем диссипативных геологических структур (ДГС) [3, 6]. При этом коренным образом изменяется напряженно-деформированное состояние (НДС) в массиве. Существующие расчетные технологии не учитывают изменения НДС оползнеопасных массивов при подготовке нового оползневого блока, что может отражаться на точности и достоверности прогнозных расчетов и надежности защитных мероприятий.

В статье рассматриваются основные закономерности образования оползневого блока (подготовленной ДГС) и его отделение от коренного массива, учет которых в расчетных процедурах позволит повысить эффективность работ по контролю и предупреждению разрушительных оползневых деформаций.

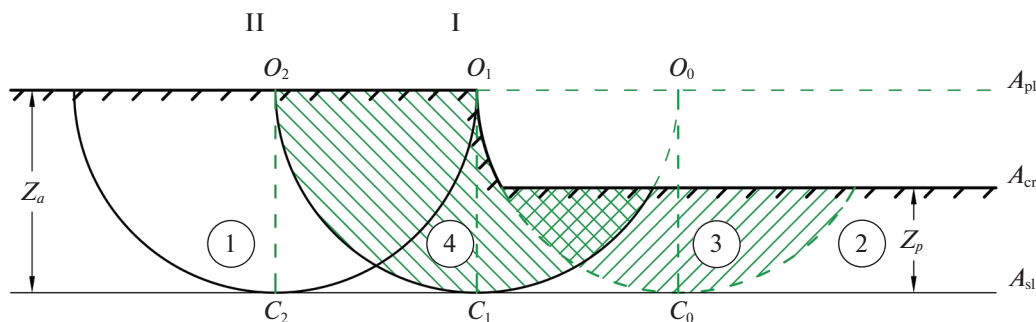
### ИСХОДНОЕ НДС ОПОЛЗНЕОПАСНОГО КОРЕННОГО МАССИВА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОДГОТОВКИ ДГС-БЛОКА

Рассматривается участок с развитием блокового оползня типа сжатия-выдавливания. Оценивается возможность образования нового оползневого блока в коренном массиве надоползневого уступа. В исходном состоянии массива (без влияния оползневого очага) напряжения в поле тяготения Земли распределяются по закону Кулона-Мора (как в воздушной и водной средах – по закону Паскаля). В соответствии с работой [6], давление в  $i$ -й точке определяется по формуле:

$$p_i = (\gamma Z_i - \sigma_{str,i}) \operatorname{tg}^2 \left( 45 - \frac{\varphi_i}{2} \right), \quad (1)$$

где  $p_i$  – давление распора в точке массива;  $\gamma$  – среднее значение удельного веса грунтов над  $i$ -й точкой;  $Z_i$  – глубина от поверхности плато до расположения рассматриваемой точки;  $\sigma_{str,i}$  – структурная прочность грунта в  $i$ -й точке;  $\varphi_i$  – угол внутреннего трения грунта.

Оползневой очаг оказывает внешнее воздействие (силовое возмущение) на коренной массив, вызывая локальную разгрузку напряжений (снижение вертикального давления) на участке его от-



**Рис. 1.** Схема расположения диссипативных геологических структур по центральному сечению оползневого очага при формировании нового оползневого блока: 1 и 2 – коренной и оползневой массивы соответственно; 3 – смещенный оползневой блок с дневной поверхностью на уровне оползневой террасы в завершении оползневого цикла; 4 – ДГС в коренном массиве; 4 – ДГС (подготавливаемый блок) в предельном состоянии коренного массива надоползневой уступа по контакту с оползневой террасой, ( $Z_a - Z_p = H_{cr}$ );  $C_0, C_1, C_2$  – точки ДГС на горизонте базиса диссипации;  $A_{pl}, A_{cr}$  и  $A_{sl}$  – уровни плато, оползневой террасы (на момент завершения оползневого цикла) и основной поверхности скольжения оползневой массива (базиса) соответственно.

коса и формирование ДГС для защиты массива от развития оползневого процесса. При этом поверхность скольжения ранее смещенных блоков (в оползневом очаге) регламентирует расположение нижней границы диссипации (базиса) в коренном массиве. ДГС имеет геометрически правильную границу – поверхность свода над зоной разгрузки напряжений (в сечении – дуга окружности). В данном случае зона разгрузки напряжений находится над базисом, и свод (граничная поверхность ДГС) вогнутой частью направлен вверх. Радиус окружности (основной параметр ДГС) – это глубина от дневной поверхности ДГС (будущего оползневой блока) до базиса  $Z_a$  (рис. 1).

К настоящему времени установлено, что образование ДГС в оползнеопасном коренном массиве – это физический процесс защиты исходного состояния геологической среды от проникновения вглубь разрушительных глубоких оползневых деформаций. Получены закономерности преобразования НДС, формирования граничной оболочки и возникновения в ней аномальных напряжений, определяющих локализацию ДГС и ее взаимодействие с оползневой поверхностью [7]. Предельное состояние ДГС устанавливается как результат этого взаимодействия.

#### Вывод уравнения предельного состояния ДГС

Ранее [4] было получено уравнение предельного состояния коренного массива при образовании нового оползневой блока при условии равенства горизонтальных напряжений распора  $\sigma_{3a}$  и отпора  $\sigma_{3p,cr}$ , когда высота откоса надоползневой массива и, соответственно, вертикальное давление на грунты на горизонте базиса (в сечении по центральному створу) достигнут критических значений:

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

где  $Z_{p,cr}$  – критическая (расчетная) глубина до потенциально деформирующегося горизонта (базиса оползания) в массиве склоновых отложений ( $Z_{p,cr} = Z_a - H_{cr}$ );  $\sigma_{str,a}$  – структурная прочность грунта на уровне базиса  $Z_a$ .

Установлено, что при подготовке оползня в исходном коренном массиве возникают ДГС в виде блоков-полуцилиндров (в сечении по створу, проходящему через центр очага – полуокруга). Рассматривается взаимодействие ДГС4 (в коренном массиве – блок с центром  $O_1$ ) и ДГС3 (в оползневом массиве – блок с центром  $O_0$ ) в сечении по центральному створу (см. рис. 1).

#### Определение напряжения в нижней точке ДГС4.

Вертикальное давление грунта на глубине  $Z_i$  равно  $\sigma_{1i} = \gamma Z_i$ . В соответствии с законом Кулона-Мора внутреннее распорное давление на оболочку определяется по (1).

Используя уравнение Лапласа и принимая радиус кривизны ДГС4 (по длине блока) равным бесконечности [4, 5], получаем для точки  $C_1$  (нижней точки в ДГС4, где действует максимальное распорное давление) напряжение в оболочке:

$$\sigma_{C_1} = p_{C_1} \frac{Z_a}{h} = (\gamma Z_a - \sigma_{str,C_1}) \operatorname{tg}^2 \left( 45 - \frac{\Phi}{2} \right) \frac{Z_a}{h}, \quad (3)$$

где  $p_{C_1}$  и  $\sigma_{C_1}$  – соответственно распорное и круговое напряжения (в вертикальном сечении) в точке  $C_1$  оболочки ДГС4;  $h$  – толщина оболочки;  $\sigma_{str,C_1}$  – структурная прочность грунта в точке  $C_1$ .

**Определение напряжения в ДГС3 оползневой массива.** ДГС3 является частью оползневой массива. В предельном состоянии для ДГС4 дневная поверхность оползневой блока-ДГС3 должна находиться на уровне  $H_{cr}$ . Принимается, что вес

грунтовой массы ДГСЗ концентрируется в оболочке структуры, определяя внешнее давление  $q$  на структуру и значения главных напряжений, действующих в оболочке. При этом внешнее давление  $q = -p$ . Для расчета рассматриваем единичное сечение — ДГСЗ в виде сегмента круга радиусом  $Z_a$  с горизонтальной хордой на глубине  $H_{cr}$  от верха (центра круга). Для  $i$ -го горизонта в сегменте ДГСЗ давление грунтовых масс на оболочку определяется выражением:

$$p_i = \gamma(Z_i - H_{cr})\text{tg}^2\left(45 - \frac{\Phi}{2}\right), \quad (4)$$

где  $Z_i$  — глубина от поверхности надоползневого уступа до  $i$ -го горизонта.

Значение структурной прочности в уравнении отсутствует, так как ДГСЗ смещается как оползневой блок по поверхности скольжения в оболочке. Поскольку внешнее давление от ДГС4 работает на подъем ДГСЗ, то значение давления на оболочку в  $i$ -й точке ( $i$ -го горизонта) от веса вышележащих грунтовых масс определяется интегрированием в пределах дуги при изменении центрального угла  $\alpha$  от 0 до  $\alpha_i$ .

$$q_i = \int p_i \alpha_i d\alpha = \int \gamma(Z_i - H_{cr})\text{tg}^2\left(45 - \frac{\Phi}{2}\right) \alpha_i d\alpha, \quad (5)$$

где  $\alpha_i$  — центральный угол отклонения от горизонтали до нормали к оболочке в ее  $i$ -й точке. Максимальное напряжение в оболочке создается в точке  $C_0$  при  $\alpha_C = \pi/2$ . Соответственно внешнее давление  $q_{C_0}$  на оболочку в точке  $C_0$  составит:

$$q_{C_0} = \gamma \frac{\pi}{2} (Z_a - H_{cr})\text{tg}^2\left(45 - \frac{\Phi}{2}\right). \quad (6)$$

Уравнение Лапласа для ДГСЗ выглядит следующим образом:

$$\frac{\sigma_m}{R} + \frac{\sigma_t}{Z_a} = \frac{q}{h}, \quad (7)$$

здесь  $R$  — радиус кривизны оползневого блока ДГСЗ, определяющий локальные границы оползневого очага;  $\sigma_m$  и  $\sigma_t$  — соответственно меридиональное (параллельно бровке склона) и круговое напряжения (в вертикальном сечении) в оболочке ДГС. Но в сечении по центральному створу кривизна блока в меридиональном направлении практически не оказывает влияния на его взаимодействие с коренным массивом, т.е. и здесь можно принять  $R = \infty$ .

Соответственно получим критическое значение напряжения в оболочке  $\sigma_{tC_1}$  из (6) и (7):

$$\sigma_{tC_0} = Z_a \frac{q_{C_0}}{h} = \frac{Z_a}{h} \gamma \frac{\pi}{2} (Z_a - H_{cr})\text{tg}^2\left(45 - \frac{\Phi_a}{2}\right), \quad (8)$$

где  $\Phi_a$  — значение угла внутреннего трения грунта  $Z_a$ .

**Уравнение предельного состояния массива надоползневого уступа** определяется по равенству напряжений на горизонте базиса оползня в нижних точках диссипативных структур ( $C_0$  оползневого блока ДГСЗ и  $C_1$  — ДГС4) из выражений (3) и (8):

$$\gamma Z_a - \sigma_{str,C} = \frac{\pi}{2} \gamma (Z_a - H_{cr}). \quad (9)$$

Нижние точки рассмотренных структур находятся на глубине  $Z_a$ , и полученное ранее уравнение (2) и новое (9) полностью идентичны.

#### *Закономерности и этапы подготовки отделения ДГС-блока*

**Расчетная поверхность скольжения — окружность радиусом  $Z_a$ .** Так как ДГС-блок отделяется и смещается по оболочке, расчет производится по его центральному створу, где формируется предельное состояние всего ДГС-блока. Поверхность скольжения (ПС) — дуга окружности радиусом  $Z_a$ . Часть оползневого массива, расположенная ниже по створу за пределами оболочки ДГС-блока, не участвует в оценке состояния ДГС-блока, его отделении и в расчете устойчивости.

**Напряжения в оболочке ДГС.** В условиях равновесного состояния ДГС при компрессионном сжатии массива в грунтах оболочки возникают напряжения, более чем на два порядка превышающие значения давления в точке. Наибольшие их значения достигаются в грунтах на горизонте базиса. В соответствии с (8) напряжения в оболочке превышают значение давления в точке в  $Z_a/h = 1/0.009$  раза. Под действием высоких значений напряжений в узкой зоне оболочки происходят поворот ДГС и скашивание (деформация грунта как при простом сдвиге) грунтов в оболочке (см. ниже).

**Появление трещины закола** (опущенной трещины растяжения) на поверхности коренного оползнеопасного массива свидетельствует о том, что ДГС-блок приближается к моменту отделения от коренного массива, и является индикатором начала вращения ДГС по оболочке. С перемещением (вращением) ДГС начинается процесс скашивания грунтов в оболочке. При этом **грунты в оболочке сохраняют исходные значения прочности, в том числе на горизонте базиса.** Структурные связи в первоначальном состоянии. НДС в точке  $C_1$  базиса (см. рис. 1) определяется по (9). Поверхность скольжения отсутствует. ДГС-блок является частью коренного массива.

**Завершение процесса скашивания грунтов в оболочке ДГС-блока.** Грунты в оболочке находятся в узкой напряженной зоне. Толщина оболочки  $h = 0.009Z_a$  (т.е. более чем в 100 раз меньше основного параметра  $Z_a$ ). Критическое значение смещения грунта в оболочке (дуга) составляет:

$$\Delta_{cr} = h = 0.009Z_a. \quad (10)$$

Эти параметры подтверждаются также результатами обобщения наблюдаемых данных оползневых блоковых смещений бортов карьеров и откосов отвалов, полученными А.М. Деминим [1]. При этом в соответствии с механизмом функционирования ДГС, угол поворота ДГС-блока  $\alpha_{cr} = 0.00901944$  радиан (или  $\alpha_{cr} = 0^\circ(\pi^3)'$  (ноль градусов  $\pi^3$  минут)). Грунты в оболочке сохраняют исходные значения прочности. В точке  $C_1$  достигается предельное состояние, в том числе по предельным значениям смещения и поворота ДГС-блока. Поверхности скольжения пока нет. ДГС-блок является частью коренного массива. **Состояние устойчивости ДГС-блока – предельное** и по (9), и по критическим значениям  $\Delta_{cr}$  и  $\alpha_{cr}$ . Однако при этом не происходит сразу нарушения устойчивости массива надоползневого уступа. В оболочке ДГС-блока начинается процесс скашивания грунтов с одновременным поворотом ДГС-блока по окружности радиусом  $Z_a$  (в сечении по центральному створу).

**Отделение ДГС-блока.** По достижении условия предельного состояния в соответствии с (9) и критических значений  $\Delta_{cr}$  и  $\alpha_{cr}$  происходит разрыв структурных связей в грунтах оболочки ДГС на горизонте базиса по центральному створу участка подготовки оползневого блока. Одновременно структурные связи разрушаются по всей протяженности оболочки ДГС-блока. Образуется поверхность скольжения (сдвига). Возникший новый блок становится оползневым (в правой части уравнения (9) также возникает множитель  $\pi/2$ ). Создается опасное отношение моментов сдвигающих и удерживающих сил  $\gamma Z_a / \gamma(Z_a - H_{cr})$ . Расчет устойчивости производится по центральному створу с поверхностью скольжения в виде дуги окружности радиусом  $Z_a$  в условиях, когда  $c = 0$  и  $\sigma_{sr} = 0$ , угол  $\varphi$  – как по подготовленной поверхности (повторный сдвиг). При этом возникает неуравновешенный момент, вызывающий резкое смещение тыловой части блока.

**Коэффициент запаса  $K_3$  устойчивости склона** можно оценивать по степени приближения величины текущего смещения ДГС-блока относительно его предельного значения, в частности используя выражение:

$$K_3 = \Delta_{cr} / \Delta_i. \quad (11)$$

Когда  $K_3$  становится равным единице, возникает ПС с разрывом структурных связей, происходит отделение ДГС-блока, и в соответствии с (9) отношение удерживающих сил в ДГС-блоке на горизонте базиса к сдвигающим силам достигает запредельно низкого значения  $\gamma(Z_a - H_{cr}) / \gamma Z_a \approx 0.5$ .

Ниже приводятся сопоставительные расчеты состояния коренного массива при образовании

оползневого блока по схемам ДГС и сдвига (Geostab) на примере оползня на участке Хорошево (2007 г.).

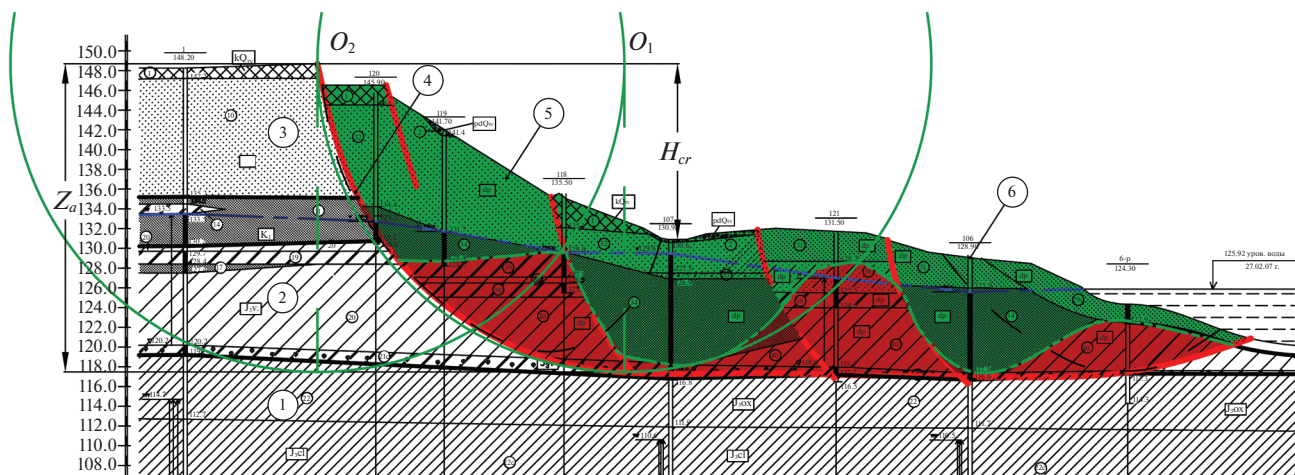
## ХАРАКТЕРИСТИКА СУЩЕСТВУЮЩИХ РАСЧЕТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### *Модели образования блока на основе закона Кулона–Мора в касательных напряжениях*

Вследствие возникновения пластических деформаций грунтов и из-за превышения действующими касательными напряжениями сопротивления сдвигу грунтов в точках массива при фактических значениях нормальных напряжений, происходит концентрация смещений в определенных зонах, т.е. формирование наиболее опасной поверхности скольжения. Грунтовый массив представляет собой сложную геологическую среду, к которой идеализированные схемы трудно применимы. Обычно используется схематизация инженерно-геологических условий и расчетных моделей. Чаще всего принимается круглоцилиндрическое очертание поверхности скольжения, особенно для массива однородного сложения. Существует ряд методических рекомендаций по выполнению расчетных процедур для определения коэффициента устойчивости склона (базирующиеся в основном на рассмотрении плоской задачи механики грунтов) путем подбора центра наиболее опасной поверхности скольжения, по которой коэффициент устойчивости имеет минимальное значение. Используются и другие очертания возможной поверхности скольжения: в виде плоских площадкам – методы Г.М. Шахунянца и Р.Р. Чугаева, Маслова-Беррера – метод горизонтальных сил), схемы с предположением утолщенной зоны смещения и деформированием ее в виде выдавливания и др. Однако принятая схематизация исходных условий исследуемого склона (оползневого участка) нередко может вызывать существенные отклонения от действительного механизма возникновения и развития оползневого процесса в коренном грунтовом массиве и приводить к неверной оценке его устойчивости и деформационного поведения.

### *Численные методы расчета устойчивости массива*

При данном подходе рассматривается соотношение касательных напряжений и прочности грунта в каждой точке массива. То есть предполагается анализ полей прочности и касательных напряжений. При этом определяется коэффициент устойчивости  $K$  в точке массива по отношению прочности грунта ( $S$ ) к значению максимального касательного напряжения ( $\tau$ ) (по потенциально опасной площадке сдвига):



**Рис. 2.** Схематический инженерно-геологический разрез по центральному створу очага смещения нового оползневых блока на оползневом участке Хорошево (Москва) с выделением ДГС. 1 и 2 – соответственно глины волжского и оксфордского ярусов юрской системы; 3 – пески четвертичных отложений; 4 – поверхность скольжения; 5 – тело оползня; 6 – скважина. Границы ДГС показаны окружностями с центрами  $O_1$  и  $O_2$ .

$$K = \frac{S}{\tau} \quad (12)$$

Для построения поля прочности грунтов требуются многочисленные испытания грунтов на сдвиговые усилия с выделением и анализом инженерно-геологических элементов. Распределение касательных напряжений определяют путем расчетов, математического или физического моделирования, с учетом существующего напряженного состояния. Далее производится сопоставление прочности и касательных напряжений в точках на разрезе массива, выделение зон с пониженной устойчивостью, проявлением пластических деформаций и выбор на основе их анализа наиболее вероятной поверхности смещения.

Для решения рассмотренных выше задач расчета НДС склонов достаточно широко используются численные методы: метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР) и метод граничных элементов (МГЭ). Эти методы относятся к приближенным способам решения задач теории упругости. Разработаны специальные программы для выполнения расчетных процедур на ЭВМ. Оценка устойчивости склона также базируется на выявлении состояния в точках по (12). Однако точность численных решений не всегда в достаточной степени увязывается с существом физической задачи.

В существующих расчетных технологиях не учитывается изменение исходного НДС массива в связи с возникновением ДГС и образованием оболочки, в узкой зоне которой концентрируются высокие значения напряжений, а деформируются в условиях компрессионного сжатия до достижения критического состояния, в соответ-

ствии с (10), т.е. по величине смещения  $\Delta_{cr}$  и углу поворота ДГС  $\alpha_{cr}$  на горизонте базиса.

#### *Пример активизации оползневых процессов на участке Хорошево*

В 2006–2007 гг. в оползневом цирке с блоковым развитием деформаций на берегу р. Москва (участок Хорошево, г. Москва, Карамышевский проезд) произошла катастрофическая активизация оползневых процессов с образованием нового блока и перемещениями оползневых масс на протяжении 350 м по берегу. В связи с угрозой оползневых деформаций для жилых домов и действующего Храма Животворящей Троицы (архитектурный памятник XVI в.) были проведены инженерно-геологические изыскания и мониторинг деформаций склона и сооружений, в том числе инструментальные наблюдения за глубинными деформациями (инклинометрические и тензометрические измерения), в результате которых, в частности, была установлена основная поверхность скольжения (базис оползня) на глубине  $Z_a = 31$  м (рис. 2).

В соответствии с результатами инженерно-геологических изысканий и обследования участка получены значения расчетных показателей для юрских глин оксфордского яруса:  $c = 47.2$  кН/м<sup>2</sup>;  $\phi = 22^\circ$ ; среднее значение удельного веса грунтов над кровлей оксфордских глин  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup>;  $R = 180$  м – радиус кривизны бровки оползневых склона в плане; критическая высота стенки срыва (откоса коренного массива) перед активизацией оползня  $H_{cr} = 16$  м.

*Оценка состояния массива надоползневого уступа по схеме ДГС*

*Расчет предельного состояния с учетом ДГС по (9).* Оценка условий формирования предельного состояния предполагает выявление реальных параметров ДГС и расчетных схем, в соответствии с исходными инженерно-геологическими и геоморфологическими условиями участка, анализом действующих экзогенных геологических процессов и определением базиса процесса. Подставляя исходные данные, указанные выше, в формулу (9) получим:  $Z_a = 31.8$  м. То есть имеет место практически полное совпадение результатов расчета  $Z_a$  и фактических измерений по глубинным устройствам на оползне.

Таким образом, технология оценки состояния массива на основе анализа ДГС позволяет определять местоположение потенциально деформирующегося горизонта (базиса диссипации) в оползнеопасном коренном грунтовом массиве, используя данные обследования участка и ограниченные сведения о геологическом строении и физико-механических свойствах слагающих массивов грунтов, и получать необходимую информацию для проведения расчетов устойчивости и проектирования необходимых защитных мероприятий в целях обеспечения безопасного функционирования инженерных сооружений.  $Z_a$  является основным параметром ДГС. Для построения ДГС на разрезе по центральному створу (см. рис. 2, окружности с центрами  $O_1$  и  $O_2$ ) использовано положение трещины закола, обозначающей проявление тыловой границы ДГС-блока с центром  $O_1$ , и базиса диссипации [7].

*Допредельное смещение ДГС-блока.* В соответствии с результатами теоретических исследований толщина оболочки ДГС на данном участке составляет  $h = 0.009Z_a = 0.29$  м. Следовало бы ожидать, что отделение ДГС-блока должно было начаться, когда его смещение на допредельном этапе достигнет, согласно (10),  $\Delta_{cr} = h = 0.009Z_a = 0.29$  м.

Но на этапе подготовки оползневого блока мониторинг состояния массива еще не проводился. Однако коммунальные службы жилых домов осуществляли оперативные наблюдения за деформациями по образовавшейся трещине закола по двум маркам с сентября 2006 г. Уже за 10 сут конца сентября – начала октября амплитуда вертикального смещения по трещине составила 0.16 м. Далее скорость оседания ДГС-блока замедлилась. Но ДГС-блок на этот момент составлял единое целое с коренным массивом; при этом прочность структурных связей в грунтах оболочки сохранялась. Интенсивное оседание ДГС-блока с образованием поверхности скольжения (основ-

ное смещение) началось в январе 2007 г., а в феврале высота новой стенки срыва достигла 3 м.

*Дополнительные примеры активизации оползневого процесса*

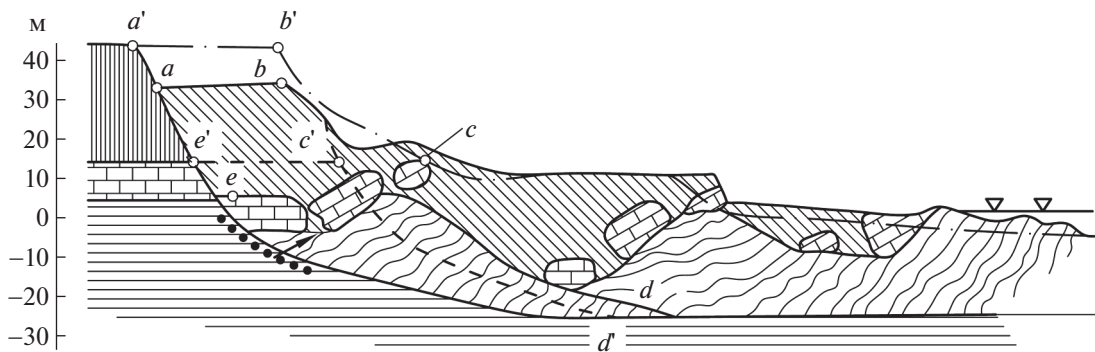
Поведение коренного массива надоползневого уступа при подготовке нового оползневого блока можно также рассмотреть на примере оползневого участка в Одессе. На одесском побережье получили распространение типичные блоковые оползни сжатия-выдавливания. По описанию П.Н. Науменко [3], на участке XII амфитеатра в 1964 и 1965 г. произошло образование новых оползневых блоков.

Протяженность амфитеатра по берегу 990 м, высота бровки берегового склона над морем в центральной части амфитеатра 42–43 м. Геологический разрез склона типичен для морского побережья Одессы (рис. 3).

В июле 1965 г. к юго-западу от блока, отчленившегося в 1964 г., на плато появилась трещина растяжения, превратившаяся затем в трещину закола нового оползневого блока. Отделение и оседание блока произошло 14.12.1965 г. За развитием деформаций по трещине и смещением формирующегося блока проводились геодезические наблюдения в период до его отделения по 10.12.65 г. Осадка блока за указанный период составила 0.59 м, а горизонтальные смещения – 0.22 м [3]. В соответствии с этими данными результирующее смещение на момент отделения блока достигло 0.63 м (спустя более 4 мес. с проявления трещины закола на поверхности плато). Глубина до базиса оползания блока на участке  $Z_a \approx 70$  м (см. рис. 3). В соответствии с технологией оценки состояния массива на основе анализа ДГС по (10),  $\Delta_{cr} = 0.009Z_a \approx 0.63$  м. То есть в данном случае имеет место полное совпадение расчетных и фактических данных.

Ранее П.Н. Науменко в работе [2] представил результаты мониторинга развития оползневых смещений в 1963 г. на III амфитеатре побережья Одессы. Там также были проведены наблюдения на этапе подготовки оползневого блока до его отделения от плато. По центральному створу до отделения блока его результирующее смещение (включая вертикальные и горизонтальные составляющие) составило 0.52 м. Параметр  $Z_a$ , согласно представленным данным, находился в интервале 58–59 м, следовательно, и смещение нового оползневого блока началось после достижения  $\Delta_{cr} = 0.009Z_a \approx 0.52$  м. То есть и в данном случае теоретические результаты хорошо подтверждаются натурными наблюдениями.

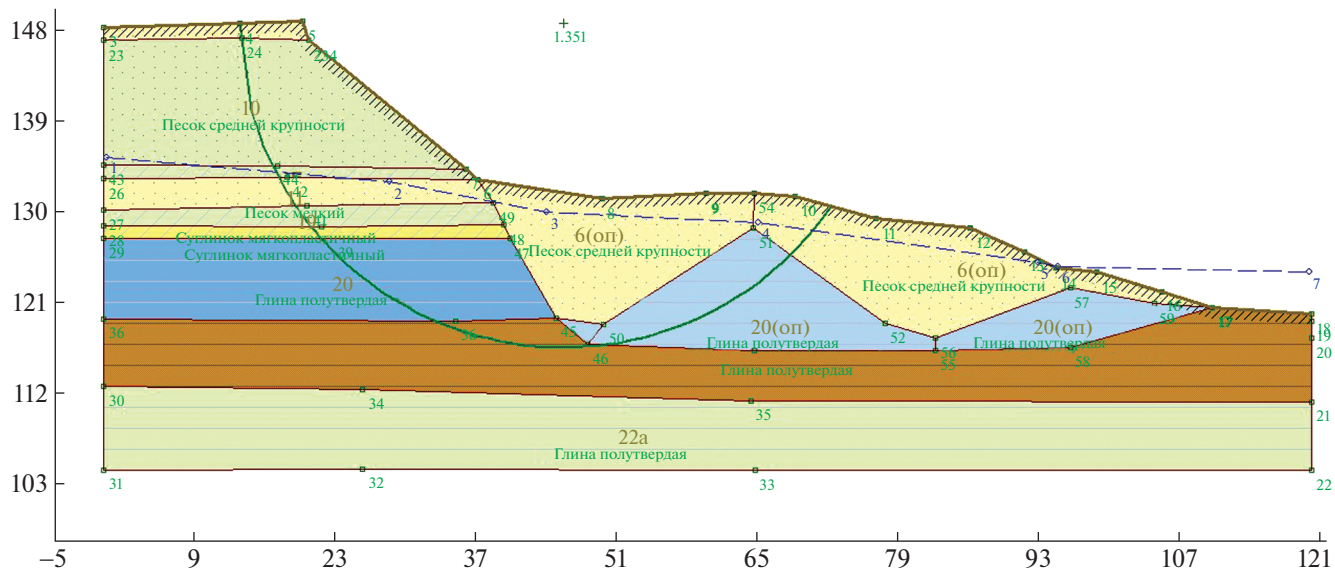
Таким образом, выявленные количественные критерии допредельного деформирования ДГС универсальны и проявляются в любых условиях



|                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| Отметки, м (1964 г.) | 42.9 | 31.4 | 33.2 | 34.2 | 17.0 | 19.6 | 10.5 | 10.4 | 11.2 | 2.2 | 0.1 | 0.9 | 1.1 |
| Расстояния, м        | 20   | 20   | 6    | 20   | 11   | 17   | 22   | 33   | 20   | 22  | 8   | 11  | 12  |



**Рис. 3.** Геологический разрез по центральному створу участка после образования и смещения нового оползневого блока в XII амфитеатре берега моря в г. Одессе 29.02.1964 г., по П.Н. Науменко [3]. *a'b'c'd'e'* – положение блока (массива) нового закола до подвижки 29.02.1964 г.; *e'e'* – положение кровли известняков до оползания; *abcde* – положение соответствующих точек блока нового закола после оползания; 1 – лессовые отложения плейстоценового возраста ( $Q_{I-II}$ ), 2 – известняки понтического яруса ( $N_{2pn}$ ), 3 – глины меотического яруса ( $N_{1m}$ ) в несмещенном залегании (плиоценовые отложения мощностью 1.7 м, залегающие на кровле известняков, на разрезе не показаны); 4–6 – те же породы в смещенном состоянии; 7 – объем меотических глин, выдавленных из приподошвенной зоны нового закола; 8 – профиль склона до подвижки 29.02.1964 г.; 9 – уровень моря.



**Рис. 4.** Расчетный разрез опытного участка Хорошево-1 для выполнения расчетов в программе “Geostab”.

при подготовке нового оползневого блока, как в естественных условиях на береговых склонах, так и на техногенных образованиях (карьеры, отвалы [2]). Параметры ДГС-блока, его границы, в том числе внутренние связи между ДГС, также подтверждаются фактическими данными мониторинга активизации оползневого процесса на участке Хорошево [7].

*Сопоставительные оценки состояния коренного массива надоползневого уступа при образовании нового оползневого блока*

1. Расчет устойчивости блока по схеме сдвига в программе “Geostab” на момент его отделения (рис. 4).

ПС – окружность с центром  $O_1$ . Положение блока до отделения от плато (площадка блока на

уровне плато). По ПС сопротивление сдвигу по пиковым значениям характеристик прочности грунта (расчетным значениям), в том числе и для оползневого массива. Расчеты дали значение коэффициента устойчивости по описанной схеме:  $K = 1.75$ .

**Расчет с учетом образования ДГС.** До отделения ДГС-блок – одно целое с коренным массивом. Прочность грунтов в оболочке характеризуется пиковыми значениями. Структурные связи в грунтах оболочки не нарушены. Расчетное положение ПС – оболочка радиусом  $Z_a$ . Массивы вне пределов данной ПС не участвуют в расчетах. По (9) – предельное состояние, т.е. высота надоползневого уступа составляет  $H_{cr}$ . С учетом сохранения исходной прочности грунтов, принимая по допредельному смещению блока в соответствии с (11)  $K_{zi} = \Delta_{cr}/\Delta_i > 1$ , следует, что устойчивость блока обеспечивается,  $K > 1$ .

2. Расчет устойчивости оползневого массива в программе “Geostab” на момент положения блока с площадкой на уровне плато.

Принято, что поверхность скольжения в расчетной схеме – дуга окружности с центром  $O_1$  до точки пересечения нормали из  $O_1$  с базисом и далее по ПС массива (оболочка ДГС-блока). Характеристики прочности грунтов в зоне смещения по дуге окружности ПС имеют пиковые значения, по горизонтальной ПС – значения из испытаний на второй сдвиг по схеме “плашка по плашке”. Расчетное значение  $K = 1.35$ .

**Расчет с учетом образования ДГС.** При отделении ДГС-блока оползневой склон (ниже фронтальной границы ДГС-блока) не участвует в процессе подготовки блока и не влияет на его устойчивость. Смещение (вращательное) происходит по оболочке ДГС-блока. ПС в расчетах – окружность радиусом  $Z_a = 31$  м. В данном случае, как и в п. 1, ДГС-блок является частью коренного массива (пиковые значения характеристик прочности грунтов). ПС с разрывом структурных связей отсутствует. Соответственно по допредельным смещениям ДГС-блока  $K_{zi} = \Delta_{cr}/\Delta_i > 1$ . Как и в п. 1  $K > 1$ . Состояние массива надоползневого уступа в пределах ДГС-блока устойчивое.

3. Поиск опасной криволинейной поверхности отделения блока в программе “Geostab” (положение в разрезе и очертания) по расчетной схеме из п. 2. Значения характеристик прочности по п. 2. Расчетное значение  $K = 1.13$ .

**Расчет с учетом образования ДГС.** Как и в п. 2, в расчетной схеме по п. 3 (в программе “Geostab”) рассматривается весь склон вместе с поверхностью отделения, полученной в режиме поиска. Замечания те же, что и в п. 2. В исходном состоянии, когда блок является частью коренного массива и характеристики прочности грунтов по

ожидаемой расчетной ПС имеют пиковые значения, устойчивость блока с установленным базисом оползания обеспечивается. Допредельные значения поворота ДГС-блока и смещения, как результат скашивания грунтов в оболочке, находятся в допустимых пределах, т.е.  $K_{zi} = \Delta_{cr}/\Delta_i > 1$ . Следовательно, устойчивость ДГС-блока на данный момент обеспечивается,  $K > 1$ .

4. Расчет устойчивости нового оползневого блока в программе “Geostab” с учетом криволинейной ПС (окружность радиусом  $Z_a = 31$  м, с центром  $O_1$ , см. рис. 3).

Принято: в грунтах зоны смещения  $\sigma_{str} = 0$  (момент отделения блока после преодоления предельного состояния). По программе “Geostab” получено  $K = 0.84$ .

**Расчет с учетом образования ДГС по условиям п. 4.** Как указано выше, отделение ДГС-блока и его оседание начинается, когда состояние по уравнению (9) предельное, и достигается критерий по деформации ДГС-блока по (10), т.е. высота надоползневого уступа  $H_i = H_{cr} = 16$  м. При этом достигается также критическая величина допредельного смещения ДГС-блока  $\Delta_i = \Delta_{cr} = 0.009Z_a$ . Для условий рассматриваемого участка Хорошево  $\Delta_{cr} = 0.009Z_a = 0.29$  м. Действительно, в момент отделения ДГС-блока процесс скашивания грунтов в оболочке достигает предельного состояния, структурные связи разрушаются, образуется поверхность скольжения по всей оболочке. ДГС-блок становится оползневой. С учетом возникновения неуровновешенного момента сдвигающих сил коэффициент устойчивости  $K = (Z_a - H_{cr})/Z_a \approx 0.5$  (при  $\sigma_{str} = 0$  и превращении ДГС-блока в оползневой массив). По двум критериям (9) и (11) имеет место запредельное состояние по устойчивости массива,  $K_3 \leq 1$  и  $K \ll 1$ .

Таким образом, расчеты устойчивости массива надоползневого уступа по программе “Geostab” с допущением исходных пиковых значений характеристик прочности грунтов по ожидаемой поверхности скольжения дают расчетное значение коэффициента устойчивости выше единицы, как и в схемах с рассмотрением состояния массива надоползневого массива вместе со всем склоном. Коэффициент устойчивости значением меньше единицы получается, когда, в соответствии с механизмом функционирования ДГС, принимается, что поверхность отделения блока – окружность радиусом  $Z_a = 31$  м, сцепление  $c = 0$  и структурная прочность грунтов в зоне смещения  $\sigma_{str} = 0$ . При этом должны быть соблюдены условия, определяющие предельное состояние рассматриваемого массива:  $H_i = H_{cr} = 16$  м, соответственно равновесие по уравнению (9);  $\Delta_i = \Delta_{cr} = 0.009Z_a$ .



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены сопоставительные оценки состояния коренного массива надолгоупадающего уступа при образовании в нем нового оползневого блока с использованием программы “Geostab” и технологии оценки состояния массива при формировании и отделении ДГС в соответствии с критериями (9)–(11). Традиционные расчетные технологии оценки состояния оползнеопасного массива и изучения НДС включают подбор (поиск) схемы расчета (положение и очертание ПС, расчетные величины прочности грунтов в зоне ПС, влияние подземных вод и т.д.).

**Оценка состояния массива с учетом формирования в нем ДГС основана на выявлении ПС, как граничной поверхности объективно существующей ДГС, в соответствии физико-геологическими закономерностями трансформации исходного НДС массива при локальном воздействии на него оползневого очага. При этом расчет производится по сечению в центральном створе участка подготовки блока, а ПС представляет собой окружность радиусом  $Z_a$ .**

Как показали результаты натурных наблюдений на участках Хорошево (Москва) и оползневых амфитеатров Одессы, отделение оползневого блока происходит спустя около 4 мес. после образования трещины закола на плато. То есть до достижения критического значения смещения грунта по (10), блок является частью коренного массива, и его устойчивость обеспечивается ( $K_f > 1$ ). Отделение блока от коренного массива надолгоупадающего уступа связано с разрывом структурных связей, и в расчетах необходимо учитывать изменения прочности грунта в зоне смещения ( $c = 0$ ;  $\sigma_{str} = 0$ ), а также очертание ПС в виде окружности радиусом  $Z_a$ . Оползневой склон, расположенный ниже, не участвует в оценке устойчивости нового оползневого блока.

Расчеты показали, что учет закономерностей, выявленных на этапе подготовки образования нового оползневого блока на основе анализа формирования и функционирования ДГС (очертание поверхности скольжения, динамика прочности грунтов и др.), позволяет повысить достоверность расчетной процедуры. Следует отметить, что при отделении блока как ДГС и разрушении структурных связей грунтов по ее оболочке возникает момент сил с плечом  $Z_a$  (что не учитывается в традиционных расчетах), устойчивость отделяющегося блока резко падает, и происходит его осадка на метры и более.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин А.М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009. 79 с.
2. Науменко П.Н. Закономерности развития и механизм катастрофических оползневых смещений на Одесском побережье // Вопросы изучения оползней и факторов их вызывающих. М.: Труды ВСЕГИНГЕО, 1968. Вып. 8. С. 42–59.
3. Науменко П.Н. Условия формирования и инженерно-геологическая характеристика оползней Черноморского побережья Одессы // Оползни Черноморского побережья Украины. М.: Недра, 1977. С. 57–100.
4. Постоев Г.П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.; СПб: Нестор-История, 2013. 100 с.
5. Постоев Г.П. Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней // Инженерная геология. 2018. Т. XIII. № 3. С. 54–61.
6. Постоев Г.П., Кучуков М.М., Казеев А.И. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. 2020. № 6. С. 22–31.
7. Постоев Г.П., Кучуков М.М., Казеев А.И. Геологические закономерности образования диссипативных геологических структур – оползневых блоков // Геоэкология. № 4. С. 32–40.

## PECULIARITIES OF SLOPE STABILITY CALCULATIONS UPON THE FORMATION OF A NEW LANDSLIDE BLOCK

G. P. Postoev<sup>a,\*</sup>, A. I. Kazeev<sup>a</sup>, and M. M. Kuchukov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>\*</sup> *E-mail: opolzen@geoenv.ru*

Upon preparation of a new landslide block in the bedrock massif, the dissipative geological structures (DGS) appear in accordance with physical and geological regularities of geoenvironment functioning in the source area of landslide development. Separation of the block occurs as DGS detachment along its boundary (shell) with breaking of structural bonds in soil and subsequent rotational displacement of DGS-block (within the shell) along the resulting sliding surface as a landslide massif. The comparative calculations of massif condition assessment in preparation of the block as DGS and by existing methods of stability calculation (in particular, in the program Geostab) were analyzed. The use of the mechanism and regularities of the DGS block

preparation in the assessment of the massif state allows increasing the accuracy and reliability of the calculation procedures.

**Keywords:** *dissipative geological structures, stress-strain patterns, limit state, stability criteria, stability calculations, DGS and shear schemes*

#### REFERENCES

1. Demin, A.M. *Opolzni v kar'erakh: analiz i prognoz* [Landslides in open-cut mines: analysis and forecast]. Moscow, GEOS Publ., 2009, 79 p. (in Russian)
2. Naumenko, P.N. *Zakonomernosti razvitiya i mekhanizm katastroficheskikh opolznykh smeshchenii na Odesskom poberezh'e* [Development regularities and mechanism of catastrophic landslide displacement on the Black Sea coast near Odessa]. *Voprosy izucheniya opolznei i faktorov ikh vyzyvayushchikh. Trudy VSEGIN-GEO* [Issues of studying landslides and inducing them factors. Proc. VSEGINGEO]. 1968, is. 8, pp. 42–59. (in Russian)
3. Naumenko, P.N. *Usloviya formirovaniya i inzhenerno-geologicheskaya kharakteristika opolznei Chernomorskogo poberezh'ya Odessy* [Formation conditions and engineering geological characteristics of landslides at the Black Sea coast of Odessa]. *Opolzni Chernomorskogo poberezh'ya Ukrainy* [Landslides at the Ukrainian coast of the Black Sea]. Moscow, Nedra Publ., 1977, pp. 57–100. (in Russian)
4. Postoev, G.P. *Predel'noe sostoyanie i deformatsii gruntov v massive (opolzni, karstovye provaly, osadki gruntovykh osnovanii)* [The limit state and deformations of soils in the massif (landslides, karst sinkholes, ground basement settlement)]. Moscow, St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2013, 100 p. (in Russian)
5. Postoev, G.P. *Dissipativnye struktury v gruntovom massive na primere formirovaniya glubokikh opolznei* [Dissipative structures in the soil massif by the example of deep landslides formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, vol. XIII, no. 3, pp. 54–61. (in Russian)
6. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Fizicheskie zakony raspredeleniya davleniya v geologicheskoi srede* [Physical laws of stress distribution in the geoenvironment]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 22–31. (in Russian)
7. Postoev, G.P., Kuchukov, M.M., Kazeev, A.I. *Geologicheskie zakonomernosti obrazovaniya dissipativnykh geologicheskikh struktur – opolznykh blokov* [Geological regularities of formation of dissipative geological structures – landslide blocks]. *Geoekologiya*, 2021, no. 4, pp. 32–41. (in Russian)