

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-2-19-58-64>
УДК 624.131.7

ПОВЕДЕНИЕ ГРУНТОВ И ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ОПОЛЗНЕВОГО БЛОКА

BEHAVIOR OF SOILS AND DISSIPATIVE GEOLOGICAL STRUCTURES DURING THE FORMATION OF A LANDSLIDE BLOCK

© 2022 г. Г. П. Постоев¹, А. И. Казеев², М. М. Кучуков³

© 2022 German P. Postoev¹, Andrey I. Kazeev², Marat M. Kuchukov³

^{1,2,3} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),
Уланский переулок, д. 13, стр. 2 (а/я 145), Москва, 101000, Россия
^{1,2,3} *Sergeev Institute of Environmental Geoscience of Russian Academy of Sciences (IEG RAS),
Ulansky lane, 13, bld. 2 (POB 145), Moscow, 101000, Russia*

opolzen@geoenvironment.ru¹, kazeev@yandex.ru²

Аннотация: При развитии оползневой массы нередко в качестве основных факторов, определяющих возникновение оползня или его активизацию, выделяют особенности состояния и прочности грунтов, их проявления как «слабого» слоя в массиве, а также изменение свойств грунтов под воздействием природных и техногенных факторов. Эти представления распространяют как на покровные неглубокие оползни типов сдвига-скольжения и разжижения-течения, так и на глубокие блоковые оползни типа сжатия-выдавливания с выделением в последних грунтов так называемого «основного деформирующегося горизонта». Образование нового оползневой массы сопровождается проявлением разрушительных смещений на оползневой территории, захватывающем весь склон. Такие события нередки на урбанизированных территориях, на склонах с развитием глубоких оползней сжатия-выдавливания. В данной статье рассматривается механизм образования оползневой массы и геологические закономерности преобразования напряжённо-деформированного состояния массива. Представлены новые данные о поведении грунтов на различных этапах диссипации, в том числе при отделении от коренного массива возникшей диссипативной геологической структуры в виде оползневой массы.

Abstract: The peculiarities of soil state and strength and its role as a “weak” layer in the groundmass are often represented as the main factor that determines the occurrence of a landslide or its activation. These concepts are usually extended both to shallow shear landslides and liquefaction-flow types, as well as to deep block landslides, such as compression-extrusion type, with the release of so-called “the main deformable horizon” of soils in the latter. The formation of a new landslide block is accompanied by the occurrence of destructive displacements in the landslide cirque, involving in displacements of the whole slope. Such events are common in urbanized areas, on slopes with the development of deep compression-extrusion landslides. This article discusses the mechanism of formation of a landslide block and the geological features of transformation of the stress-strain state of the ground mass. New data on the behavior of soils at various stages of dissipation are presented, including the case when the dissipative geological structure is separated from the bedrock in the form of a landslide block.

Ключевые слова: грунтовой массив, оползневой цирк, глубокий блоковый оползень, напряженно-деформированное состояние грунтов, сдвиг грунтов.

Keywords: soil groundmass, landslide cirque, deep block landslide, stress-strain state of soils, skewing of soils.

Введение

В статье рассматривается оползневой цирк, в котором оползневой тело представлено смещёнными блоками (блоковый оползень сжатия-выдавливания [4]). Данные оползни в зарубежной литературе клас-

сифицируются как оползни вращения либо сложные оползни [8]. При естественном развитии оползневой процесса в цирке периодически происходит катастрофическая активизация оползневых деформаций (стадия основного смещения), связанная

с образованием в коренном массиве надоползневой уступа нового оползневой блока. При этом цикл развития оползня (период между активизациями, с образованием и отделением от коренного массива нового оползневой блока) в естественных условиях может достигать сотен и тысяч лет [1]. Формирование и отделение блока связано с трансформацией исходного напряженного состояния, образованием в массиве новых крупных структур, в которых на разных этапах их функционирования проявляются закономерные особенности поведения грунтов.

Исходные прочность и состояние грунтов в массиве

Коренной грунтовой массив, не затронутый оползневой процессом, находится в условиях компрессионного сжатия. Согласно законам физики, в воздушной и водной среде давление в точке вызывается весом столба газа или жидкости над ней (закон Паскаля с учетом земного тяготения). В геологической среде также в соответствии с законами физики давление в точке определяется весом столба грунта, но с учетом сил сопротивления, вызываемых прочностью структурных связей и трением между частицами грунта.

Напряженно-деформированное состояние грунта в точке в условиях компрессионного сжатия характеризуется законом прочности Кулона-Мора [5]:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = \operatorname{tg}^2(45 - \frac{\varphi}{2}), \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 — наибольшее и наименьшее главные напряжения соответственно; σ_{str} — структурная прочность грунта; φ — угол внутреннего трения грунта.

Структурная прочность σ_{str} определяется как предельное давление при испытании образца грунта на одноосное сжатие. Она характеризует прочность структурных связей грунта, прочность грунта как материала. Аналитически структурная прочность грунта: $\sigma_{str} = 2c \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)$, где c — сцепление грунта.

От вертикального давления $\sigma_{1i} = \gamma Z_i$ в каждой i -той точке массива (элементарном объеме грунта) на глубине Z_i возникает распорное давление p_i , в соответствии с (1):

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

Таким образом, формируется статичное напряженно-деформированное состояние (НДС) в грунтовой массиве, сопровождающееся действием распорного давления по (2) и зависящее от исходных геологических условий и совокупности других факторов, проявляющихся в каждой i -той точке массива.

Грунт в каждой точке характеризуется структурной прочностью, которая зависит от факторов естественного сложения, в том числе влияния тектонических нарушений, особенностей литологии, влажности и величины угла внутреннего трения, в условиях компрессионного сжатия.

Диссипация влияния склона (первый этап диссипации)

Формирование склона, развитие процессов выветривания и оползневых смещений разуплотнённых покровных масс, изменение угла наклона поверхности склона и другие причины вызывают изменение напряжений в каждой i -той точке массива как на участке склона, так и в грунтах, залегающих за бровкой склона (в коренном массиве). Формирование склона и склоновые процессы инициируют разгрузку напряжений в коренном массиве, что проявляется в снижении давления распора в точках в зависимости от степени их близости к бровке склона (зоне разгрузки напряжений). При этом происходит плавное оседание поверхности коренного массива с формированием наклона к бровке склона. В выражении распорного давления появляется новый множитель, который учитывает степень удаления точки в массиве от бровки склона [6]:

$$p_i = (\gamma Z_i - \sigma_{str}) (1 - \frac{1}{R_i}) \cdot \operatorname{tg}^2(45 - \frac{\varphi}{2}), \quad (3)$$

где $R_i = \Delta_i + R_0$; R_0 — радиус кривизны бровки склона; Δ_i — расстояние от точки по горизонтальной поверхности на глубине Z_i до бровки склона (проекция бровки на горизонт), по нормали к бровке.

Сравнивая выражения (2) и (3), можно отметить, что вертикальное давление сохраняется в точке в исходном значении. Влияние разгрузки напряжений (снижение отпора со стороны склона) и появление деформаций в точке вызывает в основном, в соответствии с (3) и выражением $\sigma_{str i} = 2c_i \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi_i/2)$, снижение величины сцепления (вследствие деформаций структурных связей) и, соответственно, структурной прочности. Значение угла внутреннего трения практически мало изменяется [6].

Указанные изменения исходных значений состояния и прочности грунта в точках коренного массива происходят в связи с возникновением силовых линий в поле напряжений. НДС изменяется посредством взаимодействия рассматриваемых точек между собой по схеме равенства распора отпору (отпор регламентирует изменение давления в точке), без образования на этом этапе диссипации каких-либо новых границ и структур.

Диссипативные геологические структуры (второй этап диссипации)

Профессором И. Р. Пригожиным (нобелевский лауреат 1977 г., Бельгия) было установлено, что в физических и химических процессах при определенных условиях возникают диссипативные структуры [9]. В работе [5] было показано, что в геологической среде, как и в других средах (воздушной и водной), на участках локального силового возмущения (изменения исходного напряжённо-деформированного состояния (НДС) возникает физический процесс диссипации внешнего воздействия с образованием новых структур. Геологический процесс образования в оползнеопасном коренном массиве диссипативных геологических структур (ДГС) начинается, когда проявилась нижняя граница диссипации (базис диссипации — базис оползания на склоне) и создаётся угроза распространения разрушительных оползневых деформаций в грунтах коренного массива. ДГС образуются как защитные структуры, взаимодействующие с оползневым участком и предотвращающие распространение оползневого процесса далее на коренные грунты.

Оползневой цикл на участке естественного развития блокового оползня сжатия-выдавливания завершается образованием относительно ровной оползневой террасы. Высота надоползневого уступа (откоса коренного массива) при этом достигает предельного значения (рис. 1).

На этом этапе в коренном массиве образуются новые диссипативные геологические структуры в виде полуцилиндров [5]. Новые геологические образования выступают как отдельные замкнутые грунтовые массивы с геологическими границами, со своим НДС. На участке оползневого цирка нижней

границей диссипации влияния оползневого процесса и базисом возникших крупных структур в коренном массиве (в сечении по центральному створу) является базис смещения оползневого массива в цирке (поверхность скольжения). Функционирование ДГС определяет закономерности подготовки предельного состояния в оползнеопасном коренном массиве и проявления разрушительных деформаций при отделении и смещении ДГС в виде нового оползневого блока (рис. 2). Новый блок отделяется от коренного массива по границе ДГС, которая в верхней части выглядит как вертикальная «стенка срыва». Далее блок осуществляет вращательное движение по круговой (в вертикальном сечении по центральному створу) поверхности скольжения, которая образовалась в оболочке ДГС (рис. 2).

К настоящему времени известно, что ДГС образуются не только при подготовке оползневых блоков, но и при образовании провалов над подземными полостями, в грунтовом основании под нагрузкой от фундамента сооружения, а также такие структуры выявлены при геодинамическом анализе геологических условий месторождений полезных ископаемых [3, 5, 7].

Грунты внутри ДГС в коренном массиве оползневого участка сохраняют исходную прочность и давление распора в точках, в соответствии с уравнениями (1) и (2). При этом грунты создают общность, объединение в отдельную замкнутую структуру — ДГС. НДС грунтов внутри ДГС практически остается неизменным, как и в исходном положении коренного массива. Основные изменения концентрируются в грунтах по граничной оболочке ДГС (выше поверхности скольжения).

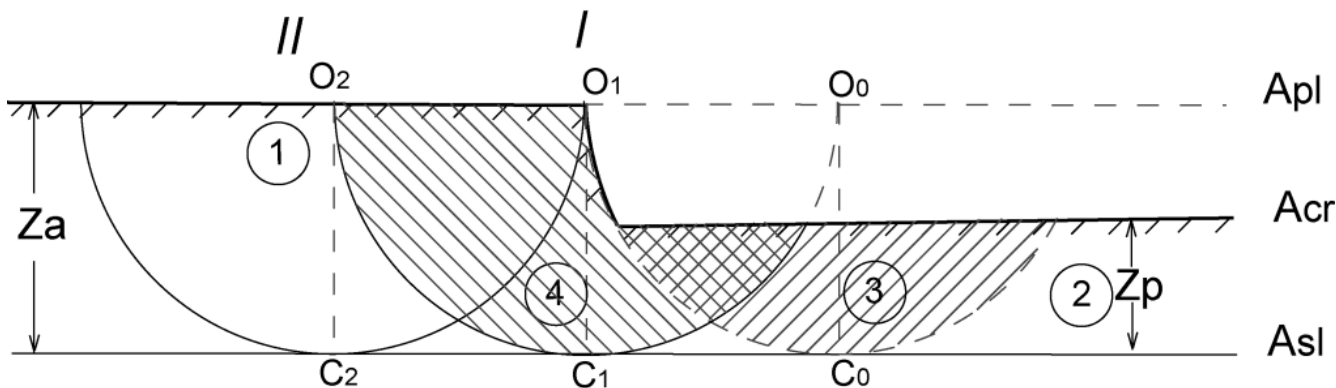


Рис. 1. Схема расположения диссипативных геологических структур по центральному сечению оползневого очага при формировании нового оползневого блока. 1 и 2 — соответственно коренной и оползневой массивы; 3 — смещенный оползневой блок с дневной поверхностью на уровне оползневой террасы, в завершении оползневого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

Грунты в оболочке находятся под действием напряжений, значительно превышающих распорное давление в точке [5]:

$\sigma_{mi} = Z_a p_i / h$, где σ_{mi} — кольцевое напряжение в оболочке на глубине Z_i , по касательной к круговой границе ДГС; Z_a — глубина от бровки склона (бровки откоса коренного массива) до нижней границы (базиса) ДГС, радиус круговой границы ДГС, в вертикальном её сечении; h — толщина оболочки.

Таким образом, напряжения в грунтах у границы ДГС в Z_a выше, чем давление в точке на глубине Z_i в грунтах ДГС (величина Z_a может составлять десятки и сотни метров). Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям, σ_{mi} превышает p_i более, чем на два порядка.

В оболочке формируется узкая зона по цилиндрической поверхности ДГС, где грунты под действием кольцевых напряжений σ_{mi} и вращательного движения ДГС находятся в условиях скашивания с одинаковой угловой деформацией во всех точках оболочки. Общие условия деформирования регламентируются изменением НДС в нижней точке ДГС, на горизонте её базиса. При этом угловые деформации скашивания вызывают растяжение грунта в узкой зоне оболочки в условиях компрессионного сжатия геологической среды, включая зону оболочки.

НДС грунтов в оболочке. На горизонте базиса (нижней границе диссипации), где, как указано выше, распорное давление в ДГС имеет наибольшее значение, происходит снижение отпора (разгрузка напряжений) со стороны оползневого склона, возникают пластические деформации грунта в нижней части ДГС и, соответственно, снижается напряжение в оболочке. Массив ДГС осуществляет вращательное движение единым жёстким телом по оболочке, как в узкой зоне сдвига, при сохранении её исходной толщины и связей грунтов оболочки и ДГС, т. е. подобно неразрывному угловому скашиванию грунтов в контактной зоне. Происходят осадка грунтов в верхней части оболочки и деформации поворота (вращение в сторону источника силового возмущения — оползневого массива) грунтов, прилегающих к базису. Возможны также деформации скашивания и по внутренним граничным оболочкам, образующим связи между ДГС (рис. 1, линия $C_2 O_1$).

Перемещение ДГС относительно оболочки, подобное скашиванию (схема простого сдвига), происходит в слое толщиной $h = 0,009 Z_a = \text{const}$. Массив ДГС осуществляет вращательное движение в сторону источника возмущения. Процесс деформирования по схеме простого сдвига по всей оболочке ДГС регламентируется изменением



А



Б

Рис. 2. Стенка срыва нового оползневого блока глубокого оползня и разрушительные деформации при активизации оползневого процесса на участке Хорошево-1 (Москва, 2006 г.):

А — на территории храма Живоначальной Троицы;

Б — на территории ЖК «Годуново»

НДС в точке C_1 (рис. 1, ДГС4 с центром O_1). В целях защиты геологической среды от распространения оползневого процесса в ходе развития диссипативного геологического процесса предусмотрена возможность отделения ДГС в виде оползневого блока. Момент отделения наступает, когда в грунтах оболочки на горизонте базиса (точка C_1) перемещение (длина дуги) в процессе скашивания достигает критического значения $\Delta \ell = h$, то есть в оболочке толщиной h при образовании ДГС возникает механизм простого сдвига с ростом угла скашивания между внешней и внутренней поверхностями оболочки. Предельное значение угла скашивания 45° , при котором величина перемещения становится равной толщине h оболочки. В нижней точке ДГС, на горизонте базиса, сдвиг происходит практически в горизонтальном направлении (по касательной к оболочке), а на уровне верхней площадки — вниз

по вертикали, как осадка. При этом критическое значение центрального угла на дугу перемещения составит ноль градусов и (π^3) минут или $\alpha_{cr} = h/Z_a = 0,00901944$ радиана. Данное значение является постоянным независимо от размеров ДГС, то есть $\alpha_{cr} = 0,00901944 = \text{const}$, (как угол поворота жёсткого цилиндра). Соответственно толщина оболочки, в которой происходят основные изменения НДС, зависит от размеров ДГС, в частности его основного параметра — радиуса кривизны Z_a и угла α_{cr} , то есть $h = \alpha_{cr} Z_a$, где α_{cr} в радианах. Поскольку параметры процесса скашивания в оболочке едины на всех горизонтах ДГС, значение относительной осадки ДГС составляет $\varepsilon_{cr} = h/Z_a = 0,009$ (на участке выхода оболочки на поверхность). Таким образом, и по осадке предельное состояние ДГС наступает при критическом её значении $\Delta \ell_{cr}$, когда величина перемещения грунтов массива ДГС относительно оболочки в точке С достигнет

$$\Delta \ell_{cr} = h = 0,009 Z_a, \quad (4)$$

т. е. значение угла скашивания в предельном состоянии, как указано выше, составляет 45° . Следует отметить, что в процессе скашивания грунт испытывает растяжение в условиях компрессии. Если выделить в вертикальном сечении оболочки квадрат со сторонами h , то длина диагонали составит $a_0 = h\sqrt{2}$ (удлинение по сравнению с h составит 1,414).

В предельном состоянии, когда $\Delta \ell_{cr} = h$, диагональ исходного квадрата достигнет значения $a_{cr} = h\sqrt{5}$ (или 1,581 от исходной величины), т. е. удлинение диагонали и, соответственно, деформация грунта при растяжении составит более 50% или в среднем $\pi/2$ раз. Это означает, что в процессе скашивания грунта в узкой зоне оболочки проявляются пластические деформации (практически запредельные для условий свободного растяжения). В скальных и связных глинистых грунтах эти явления отражаются в образовании изгиба слоёв, складок в указанной зоне ДГС. Критическое состояние по прочности грунта в оболочке и переход от режима скашивания в деформирование сдвига регламентируется изменением НДС на уровне базиса (в точке C_1 по центральному створу) и достигается одновременно по всей оболочке.

Оценка предельного состояния

Уравнение предельного состояния коренного массива надоползневой уступа выводится из рассмотрения взаимодействия ДГС в коренных грунтах и в оползневом массиве (граничном блоке — прилегающем к коренному массиву смещённом ДГС, рис. 1):

$$\gamma Z_a - \sigma_{str,a} = \pi \gamma - \frac{Z_a - H_{cr}}{2}, \quad (5)$$

где Z_a — глубина до базиса оползания блока, γ — среднее значение удельного веса грунта до глубины Z_a , $\sigma_{str,a}$ — исходное значение структурной прочности грунта в ДГС на глубине Z_a , H_{cr} — критическое значение высоты откоса ДГС.

В соответствии с рисунком 1, анализируется НДС ДГС4 (в коренном массиве) и ДГС3 (в оползневом массиве) в сечении по центральному створу, в частности напряжения в оболочке на горизонте базиса (точка C_1) с учетом прочности грунтов в данной точке.

Следует иметь в виду, что в ДГС, как и в точке массива, действует распорное давление (2). ДГС выступает как «крупная точка», в которой отпор (со стороны оползневого склона) создаётся напряжениями в оболочке, с максимальными их значениями по нижней границе ДГС (базису A_{sl}), определяющими с учётом прочности грунтов в этой зоне и взаимодействия с геологическим процессом (оползевым), воздействующим на НДС грунтов на уровне базиса, условия равновесия ДГС по (5).

О возникновении ДГС. Переход от первого этапа диссипации ко второму (с образованием ДГС) недостаточно изучен. Как показали исследования В. В. Жихович [2], при напряжениях, не превышающих 80% от предельных, при длительном периоде изменения напряжений в массиве, что имеет место при развитии глубоких оползней, существенных изменений в напряженно-деформированном состоянии в грунтовом слое массива происходить не может (рис. 3).

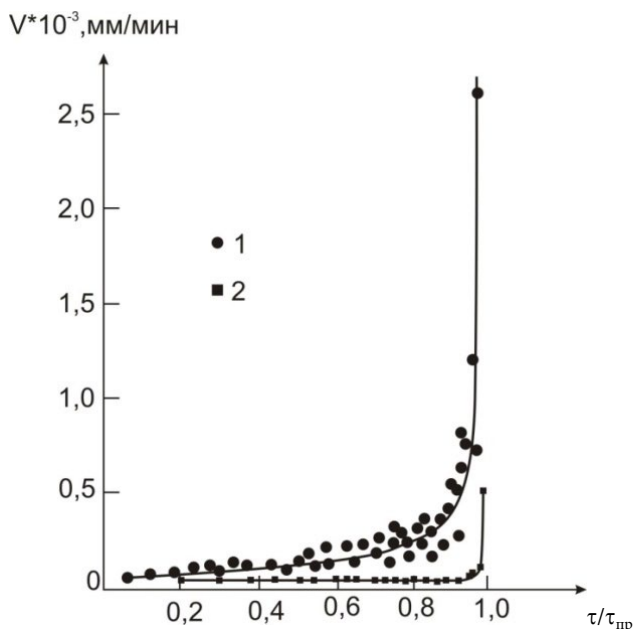


Рис. 3. Графики зависимости скорости ползучести от уровня напряжений при различном темпе нагружения глинистого грунта по В. В. Жихович [2]. 1 — испытание по схеме час-ступень; 2 — по схеме сутки-ступень.

По всей вероятности, до момента наступления предельного состояния по (5) ДГС и границы между ними в коренном массиве не проявляются. На заключительном этапе завершения оползневой цикла, когда возникает реальная угроза вовлечения в оползневой процесс и грунтов коренного массива, в нем возникают ДГС. В соответствии с результатами исследований В. В. Жихович, этот момент может быть достигнут, когда состояние коренного массива может составлять 0,8–0,9 от предельного по (5), на горизонте базиса по центральному створу. Далее начинается вращательное движение ДГС надоползневого уступа, образуется трещина закола в верхней части оболочки ДГС, и начинаются процессы скашивания грунтов в оболочке.

Отделение ДГС-блока. Нарушение равновесия по (4) и (5) приводит к резкому изменению НДС грунтов по контакту ДГС с оболочкой и отделению массива ДГС от оболочки на всём её протяжении с вращательным движением массива. Разрушение грунтового массива с отделением блока происходит по схеме компрессионного сжатия (исходные условия), где изменение НДС и подготовка предельного состояния развиваются по закону Кулона-Мора в главных напряжениях. Причём смещение массива ДГС относительно оболочки, как указано выше, вначале происходит по механизму скашивания (с поворотом ДГС), а после достижения критерия (4), в условиях предельного состояния по (5), и отделения ДГС по оболочке, развивается далее по образовавшемуся контакту с грунтами в оболочке как вращательное движение по подготовленной поверхности. У связанных глинистых и скальных грунтов процесс отделения и смещения оползневого блока приобретает катастрофический характер, поскольку происходит

разрыв структурных связей в грунтах оболочки и, соответственно, сцепление и структурная прочность грунтов по контакту становятся равными нулю.

Выводы

Геологической средой предопределяется отделение ДГС в виде нового оползневого блока в ходе развития диссипативного геологического процесса как завершающего этапа изменения исходного НДС в целях защиты геологической среды (коренного массива) на данном участке от оползневого процесса и возвращения НДС в массиве к исходным условиям.

Механизм отделения, в соответствии с теоретическими исследованиями и анализом данных натурных наблюдений, включает развитие деформаций в грунтах оболочки по схеме простого сдвига со скашиванием его нормальных к поверхности сечений до угла 45° (в предельном состоянии). При этом величина сдвига грунтов оболочки оказывается равной её толщине, а критическое значение центрального угла в ДГС на дугу сдвига составляет 0.009 радиан, соответственно, и отношение $h/Z_a = \alpha_{cr} = 0,009 = \text{const}$.

Катастрофичность развития оползневого смещения нового блока во многом определяется возникновением моментов сил, действующих в оболочке ДГС-блока. Если в предельном состоянии уравнение (5) определяет равновесие напряжений в нижней части ДГС, на горизонте базиса, то после отделения ДГС момент сдвигающих сил превышает момент удерживающих сил в $\pi/2$ раз (отделившийся блок становится оползневым, и в правой части уравнения (5) также появляется коэффициент $\pi/2$), что приводит к катастрофическому изменению соотношения сил и возникновению разрушительных оползневых деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянова Е. П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 308 с.
2. Жихович В. В. О наличии оползней выдавливания на склонах одесского побережья // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 5. С. 7–11.
3. Казанкова Э. Р., Корнилова Н. В. Структурирование геологической среды на различных уровнях организации // Актуальные проблемы нефти и газа. Вып. 1 (20). 2018. С. 1–15.
4. Оползни и сели / Шеко А. И., Постоев Г. П., Кюнтцель В. В. и др. / Гл. ред. Козловский Е. А. — М.: Произв.-изд. комбинат ВИНТИ, 1984. — Т. 1. — 352 с.
5. Постоев Г. П., Кучуков М. М., Казеев А. И. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 6. С. 22–31.
6. Постоев Г. П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.; СПб.: Нестор-история, 2013. 100 с.
7. Постоев Г. П. Модели механизма формирования и расчёта провалов земной поверхности над подземными полостями // Геоэкология, 2020. № 4. С. 36–47.
8. Cruden D. M., Varnes D. J. Landslide types and

- processes. In: Turner A. K.; Shuster R. L. Landslides: Investigation and Mitigation: Transportation Research Board, US National Research Council. Washington, D. C., 1996. Spec. Rep. No. 247. P. 36–75.
9. Prigogine I., Nicolis G. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. New York: J. Wiley & Sons, 1977