ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 4, с. 32-40

_____ ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ _____ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.3;624.13

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР — ОПОЛЗНЕВЫХ БЛОКОВ

© 2021 г. Г. П. Постоев^{1,*}, А. И. Казеев¹, М. М. Кучуков¹

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

**E-mail: opolzen@geoenv.ru* Поступила в редакцию 05.04.2021 г. После доработки 17.04.2021 г. Принята к публикации 20.04.2021 г.

В геологической среде в поле тяготения Земли в каждой точке грунтового массива возникает, в соответствии с законами Паскаля и Кулона–Мора, распорное давление, которое зависит от веса залегающих выше пластов и прочности грунта в точке. Локальное силовое воздействие на оползнеопасный массив в виде экзогенных геологических процессов (оползни, эрозия, абразия и т.д.) вызывает интенсивный процесс разгрузки напряжений в прилегающем к склону коренном массиве и образование диссипативных геологических структур (ДГС). Особенности геологического строения коренного массива не влияют на проявление ДГС, их функционирование до предельного состояния и процессы отделения и смещения в виде оползневого блока. Геологические закономерности проявляются в: образовании новых геологических границ-оболочек ДГС, рассекающих существующие структуры и тектонические нарушения (как и трещины от землетрясений); создании подпора подземных вод в коренном массиве перед ДГС; формировании характерных валов сжатия (складок), грабенов; характерном изменении напряженно-деформированного состояния и свойств грунтов по оболочке, на различных этапах преобразования ДГС в оползневой блок.

Ключевые слова: *геологические закономерности, диссипативные геологические структуры, экзогенные* процессы, базис оползания, предельное состояние, оползневой блок, геологические образования и постройки

DOI: 10.31857/S0869780921040081

введение

В геологической науке оползни относятся к экзогенным геологическим процессам. При этом полагается, что основные причины развития оползневых смещений и их механизм тесно связаны с геологической историей формирования склона, включая исходные геологические структуры и тектонические границы, литологическое строение и свойства грунтов слоистой толщи, гидрогеологические условия. С другой стороны, известны многочисленные случаи деформаций и разрушения откосов техногенных земляных сооружений (насыпей, выемок, бортов карьеров), которые нередко трактуются как нарушения устойчивости сооружения по законам механики. Несомненно, геологические условия и строение грунтового массива, исходный рельеф, свойства грунтов, воздействие абразионных и эрозионных процессов должны изучаться и оцениваться при исследовании оползневого участка. Однако известно также, что геологическая история территорий творится и в современный период. Так, при землетрясениях вокруг эпицентра, временами на значительном удалении от него, образуется трещина на земной поверхности, которая на большом протяжении сохраняет относительно линейное очертание. При этом она свидетельствует о глубинном развитии деформаций и рассекает как элементы рельефа, так и геологические структуры, не согласуясь с исходными тектоническими и другими границами в массиве [1].

Цель данной статьи — показать, что формирование оползневого блок как на этапах его подготовки, так и его смещения, приводит к образованию диссипативных геологических структур (ДГС) и соответствующих новых границ в массиве с проявлением геологических закономерностей их функционирования на локальном участке развития глубокого блокового оползня.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ИСХОДНАЯ ОБСТАНОВКА НА ОПОЛЗНЕОПАСНОМ УЧАСТКЕ

Для примера рассмотрим состояние грунтового массива на оползневом участке, на котором в результате инженерно-геологических изысканий на определены геологические условия, включая установленные геологические структуры и тектонические границы, литологическое строение и свойства грунтов слоистой толщи, гидрогеологические условия. Грунтовый массив находится в условиях компрессионного сжатия, в соответствии с основами механики грунтов и законом прочности Кулона–Мора [5]:

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

где σ_1 и σ_3 — соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения; 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, характеризует прочность структурных связей грунта (прочность грунта как материала); аналитически $\sigma_{str} = 2ctg(45 + \phi/2)$, где c – сцепление грунта.

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

$$p_i = \sigma_{3i} = (\sigma_{1i} - \sigma_{str}) tg^2 (45 - \phi/2).$$
 (2)

Таким образом, в исходных геологических условиях в грунтовом массиве формируется статичное напряженно-деформированное состояние (НДС) с действием распорного давления по (2) в каждой *i*-й его точке.

Диссипативные геологические структуры

В работах [4, 5] было показано, что в геологической среде, как и в других средах (воздушной и водной) на участках локального силового возмущения (изменения исходного НДС) возникает процесс диссипации внешнего воздействия с образованием соответствующих новых диссипативных структур [7]. В геологической среде это диссипативные геологические образования структуры ДГС, в виде отдельных замкнутых грунтовых массивов с геологическими границами с НДС отличным от исходного. Функционирование ДГС определяет закономерности формирования предельного состояния в оползнеопасном коренном массиве и проявления разрушительных деформаций при отделении и смещении ДГС в виде нового оползневого блока.

Уравнение предельного состояния коренного массива надоползневого уступа выводится из рассмотрения взаимодействия ДГС в коренных грунтах и в оползневом граничном блоке – смещенной ДГС, прилегающей к коренному массиву:

$$\gamma Z_a - \sigma_{str,a} = \pi \gamma (Z_a - H_{cr})/2, \qquad (3)$$

где Z_a – глубина до базиса оползания блока в коренном залегании; γ – среднее значение удельного веса грунта в толще до глубины Z_a ; $\sigma_{str,a}$ – структурная прочность грунта в ДГС на глубине Z_a ; H_{cr} – критическое значение высоты откоса ДГС [4].

Закономерности образования диссипативных структур проявляются, в частности, в очертании их границ в виде сводов, вогнутая поверхность (сферическая, цилиндрическая) которых ориентирована в сторону снижения распорного давления в ДГС; при изменении ее состояния к критическому уровню (когда величина оседания блока достигнет H_{cr}); в наличии внутренних границ, обуславливающих взаимосвязи ДГС между собой. Концентрация напряжений от внутреннего распорного давления в грунтах в граничном своде ДГС позволяет ограничить влияние оползневого очага в пределах надоползневого уступа, без захвата остальной части коренного массива.

В соответствии с уравнением (3), при формировании предельного состояния ДГС-блока максимальные значения напряжений создаются на уровне максимальной глубины Z_a возникшей ДГС (см. рис. 1, базис Б) с учетом прочности грунтов в этой зоне.

Вместе с тем, образование диссипативных крупных структур в геологической среде, в частности в оползнеопасном массиве, — это геологический процесс изменения исходного состояния, геологических условий и строения грунтовых массивов в ограниченной области геологической среды при возникновении внешнего силового возмущения, например, оползневого очага.

Геологические закономерности проявляются в: преобразовании структурных изменений исходного поля распорных давлений в ДГС с материальными границами (оболочками) [4, 5], формировании базиса ДГС, в создании новых условий функционирования ДГС как оползневых блоков, особенностях деформирования грунтов ДГС с образованием валов сжатия, складок, грабенов и др.

ОБРАЗОВАНИЕ БАЗИСА ИЗМЕНЕНИЯ НДС МАССИВА И ПОДГОТОВКА БЛОКА ОПОЛЗАНИЯ ДГС КАК ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Подготовка оползневого блока в коренном массиве происходит как геологический процесс изменения исходного НДС и геологического строения массива. Нижняя граница образования ДГС в коренном массиве определяется по базису геологического процесса, осуществляющего силовое возмущение и обуславливающего изменение НДС на ограниченном участке склона (см. рис. 1) [4, 5].



Рис. 1. Схемы воздействия геологических процессов на формирование диссипативных геологических структур (ДГС). Образование базиса ДГС (линия Б) при: 1 – боковой эрозии склона (абразия) водоема; 2 – возникновении эрозионного очага в средней части склона; 3 – смещении блоков на оползневом участке (горизонтальная поверхность скольжения); 4 – развитии талика от водного потока в массиве ММП; 5 – разработке борта карьера или откоса отвалов; 6 – подвижке подпорной стенки. ПС – поверхность скольжения.

1. Указанная граница может сформироваться под действием боковой эрозии (абразии) с образованием клифа и возникновением прогрессирующей разгрузки напряжений в грунтах на уровне базиса эрозии (см. рис. 1.1).

2. В качестве причины образования базиса ДГС может быть возникновение эрозионного очага в месте разгрузки подземных вод на склоне (проявление "висячих" блоковых оползней) (см. рис. 1.2).

3. Нижняя граница новых ДГС — базис ранее смещенного оползневого блока (критический уровень оползневой террасы) на участках развития глубоких оползней с поверхностью скольжения (ПС) оползневого тела (см. рис. 1.3).

4. На высоких склонах, сложенных многолетнемерзлыми породами (ММП), нижняя граница ДГС может сформироваться при горизонтальном развитии талика от водных потоков (базис оттаивания грунтов), протекающих у подножья склона (см. рис. 1.4). 5. Для крупных блоковых оползней на бортах карьеров и откосах отвалов в качестве нижней границы ДГС выступает горизонт разработки продуктового слоя (нижний уровень борта) или критического состояния деформируемого горизонта отвала (см. рис. 1.5).

6. На откосе, где для обеспечения его устойчивости сооружена подпорная стенка, нижняя граница ДГС может определиться по подошве податливой (сдвинутой) стенки или, если имеется слабое основание, ниже его базиса (см. рис. 1.6).

По пунктам 1–4 причинами образования в коренном массиве являются геологические процессы, а по п.п. 5–6 – их техногенные аналоги. То есть образование базиса не столько связано с положением возможного слабого слоя в исследуемом оползнеопасном массиве, сколько с горизонтом внешнего воздействия на массив в виде экзогенного процесса или техногенной подработки склона.

Нижняя граница и основной параметр ДГС

Результаты исследований показывают, что формирование диссипативных структур в первую очередь связано с локальным изменением напряжений, т.е. с реакцией поля напряжений на ограниченное силовое возмущение. Локальное снижение напряжений вызывает диссипацию и перестройку поля напряжений в эпицентре силового возмущения в виде сферических (цилиндрических) сводов. В геологической среде такие своды на этапе подготовки ДГС представляются виртуальными, но, например, в атмосфере над зоной пониженного давления диссипативная границасвод проявляется в виде радуги.

При образовании склона (откоса) снижается вертикальное давление от веса грунтов на горизонты массива, залегающие ниже. То есть склон создает аномалию пониженных значений вертикального и соответственно распорного давления на массив, расположенный ниже его основания. В результате длительного природного процесса формирования склона происходит медленная постепенная адаптация напряженного состояния грунтового массива. Локальное силовое возмущение, например, в виде активной боковой эрозии (абразии) с размывом грунтов нижней части склона и постройкой высокого крутого откоса клифа, создает новое качество в функционировании склона. Образуется нижняя граница (базис Б) интенсивного преобразования склона, отделяющая верхний массив с динамично изменяющимся НДС от нижнего, где нет влияния склоновых процессов на исходное состояние массива.

Диссипативные структуры проявляются с граничными поверхностями в виде "опрокинутых сводов" (полуцилиндров), расположенных своими вершинами (образующими полуцилиндра) на базисе Б, и основанием (диаметральной горизонтальной плоскостью) — на уровне дневной поверхности коренного массива. Таким образом, поверхность отрыва оползневого ДГС-блока (см. рис. 1) выглядит как дуга длиной $\pi r/2$ (где $r = Z_a$ расстояние между верхней и нижней границами ДГС и соответственно радиус окружности — контура ДГС в вертикальном сечении по центральному створу оползнеопасного участка).

Таким образом, Z_a является основным параметром ДГС, так как определяет нижнюю границу и фронт диссипации (по глубине) со стороны склоновых процессов. Местоположение ДГС, в соответствии со сказанным выше, достаточно четко может быть определено на оползнеопасном участке, если проявилась трещина закола (на начальном этапе образования стенки срыва) в краевой части плато (на верхней площадке склона, откоса).

Зона отрыва оползневого блока

Подготовка оползневого блока проявляется как формирование геологических границ образуемой в массиве новой крупной структуры. В геологической среде начинают оформляться новые несущие элементы вблизи силового возмущения для восприятия энергии его воздействия в ограниченном объеме массива без участия остальной части геосреды. В качестве несущего элемента ДГС выступает его граничная оболочка, возникающие напряжения в которой на два порядка превышают исходные значения распорного давления в точках массива [5]. При этом формируется замкнутое НДС внутри ДГС; связь в напряжениях с окружающей геологической средой (за пределами ДГС) отсутствует.

В соответствии с уравнением предельного равновесия ДГС, критическое состояние структуры определяется напряжениями и прочностью грунтов на горизонте ее базиса. Причем предельное состояние достигается по вертикальному сечению центрального створа оползнеопасного массива и распространяется по всей оболочке ДГС. Зона отрыва оползневого блока – это тыловая часть оболочки ДГС. В момент нарушения равновесия по уравнению (3) на горизонте базиса ДГС по оболочке происходит разрыв сплошности (структурных связей, $\sigma_{stri} = 0$) с грунтом внутри ДГС. Причем этот процесс одномоментно захватывает граничные поверхности ДГС на протяжении всего формируемого оползневого блока. Вогнутая сторона дуги зоны отрыва указывает, что источник силового возмущения находится ниже по склону, в виде базиса разгрузки напряжений различного генезиса (см. рис. 1).

ПРИМЕРЫ ПРОЯВЛЕНИЙ ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ НОВЫХ ОПОЛЗНЕВЫХ ДГС-БЛОКОВ

Активизация оползневого процесса и подготовка нового оползневого блока на участке Хорошево (г. Москва) началась в конце 2006 г. В декабре проявилась трещина закола, в январе 2007 г. началось оседание оползневого блока со смещением грунтового массива ДГС по своей "оболочке", как по поверхности скольжения (рис. 2).

Высота откоса надоползневого уступа на момент начала отделения нового оползневого блока имела критическое значение H_{cr} (см. рис. 2). Это было установлено по результатам анализа положения оползневой террасы и вычислительных процедур по оценке состояния надоползневого уступа по уравнению предельного состояния (3), в сопоставлении с данными мониторинга.



Рис. 2. Схематический инженерно-геологический разрез по центральному створу (I - I) очага смещения нового оползневого блока на оползневом участке Хорошево (Москва). 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-блоков показаны, как дуги окружности радиусом Z_a , зелеными линиями. *А*, *B*, *C*, *D* – индикаторы проявления ДГС.



Рис. 3. Фото поднятой трещины сжатия у подножья откоса нового блока на участке Хорошево (Москва).

Возникновение трещины закола (см. рис. 2, точка O₂) — выход на поверхность новой геологической границы (оболочки) нового оползневого ДГС-блока.

Положение в коренном массиве надоползневого уступа базиса ДГС определено расчетом по уравнению предельного равновесия (3), анализировалось НДС на горизонте базиса ДГС в коренном залегании и в оползневом массиве. На основе расчетов было показано, что ДГС с центром O_2 (см. рис. 2) достигнет предельного состояния, когда оползневой ДГС-блок с центром O_1 осядет до уровня оползневой террасы, т.е. на H_{cr} .

В результате инженерно-геологических изысканий и натурных наблюдений получены данные для расчета глубины поверхности скольжения:



Рис. 4. Фото поднятой трещины сжатия в верхней части катастрофического оползня на откосе отвала в Кузбассе, 2015 г. (фото А.И. Казеева).

 $c = 47.2 \text{ кH/м}^2$; $\varphi = 22^\circ$ (средние значения); $H_{cr} = 15.8-16.0 \text{ м}$; $\gamma = 20 \text{ кH/м}^3$ (среднее округленное значение для толщи грунтов в пределах глубины Z_a). Подставив эти значения в формулу (3), получили $Z_a = 31.2-31.5 \text{ м}$ (глубина базиса оползания – нижняя граница развития диссипации).

По данным инклинометрии установлено, что $Z_a = 31.0 - 31.2$ м (в глинах оксфордского яруса юрской системы). То есть расчетная глубина поверхности скольжения Z_a была подтверждена фактическими данными инклинометрических измерений в скважинах.

Следует иметь в виду, что на результаты расчетов величины Z_a по уравнению (3) существенно влияет точность определения структурной прочности грунтов на искомой глубине, установленной по данным инженерно-геологических изыс-



Рис. 5. Схематический геологический разрез по оси оползня на Соколовой горе в г. Саратов (1968 г.) [6]. А – приподошвенная полоса верхней части склона; **Б** – **площадка просевшей поверхности земли в головной части оползня**; **В** – основная часть массива оползня, надвинувшаяся на нижнюю оползневую ступень; Γ – нижняя оползневая ступень. I – юрские (оксфордские) глины (J_3 ох); 2 – барремские пески (K_1b_1); 3 – барремские (K_1b_2) и аптские (K_1a_2) глины; 4 – нижняя пачка апта: слабые песчаники и пески (K_1a_1); 5–7 – смещенный по горизонтали массив нижнемеловых пород: 5 – барремских глин, 6 – нижней пачки апта; 7 – смещенные блоки нижнемеловых глин; 8 – перемятые оползневые глины и суглинки; 9 – пески современного аллювия; 10 – уровень грунтовых вод; 11–12 – профиль склона: до (11) и после (12) подвижки оползня; 13 – подошва оползня (она же подошва массива, надвинувшегося на нижнюю оползневую ступень); 14 – векторы смещения при подвижке оползня и их масштаб.

каний. Поэтому в расчетах должен быть учтен разброс полученных экспериментальных данных, и на определенном этапе могут быть выявлены только расчетные границы положения базиса $Д\Gamma C$ с возможным уточнением глубины Z_a в результате дальнейших исследований.

Образование поднятой трещины сжатия (рис. 3) есть проявление фронтальной границы клина элемента двух ДГС с центрами O_1 и O_2 , основанием которого является линия O_1O_2 (на рис. 2, индикатор *C*), свидетельствующая что в формировании блока частично участвует и ДГС с центром O_2 .

Подобное развитие оползневого процесса имело место и при образовании блокового оползня на других участках, например, на откосе техногенного отвала (рис. 4).

Упомянутый выше "клин" может проявиться в виде провала, с превращением поднятой трещины сжатия и площадки "клина" в "грабен" (рис. 5). Вероятно, в этом случае по фронтальной оболочке ДГС с центром O_2 (см. рис. 2) при отделении нового оползневого блока также происходит разрушение структурных связей в грунтах и, соответственно, резкое снижение их сопротивления сдвигу вдоль этой границы, как поверхности скольжения.

В приведенном примере оползня в г. Саратов упомянутый выше клин просел на 20 м (зона Б на рис. 5, шириной по верху более 60 м).

Валы сжатия — складки (см. рис. 2, индикатор *D*) образуются вследствие нарушения равновесия сил на глубине базиса ДГС, раздавливания нижних горизонтов ДГС-блока и его смещении по цилиндрической поверхности скольжения с эффектом выдавливания грунтов на участке восходящей поверхности смещения блока. Такие геологические проявления часто выявляются при построении инженерно-геологических разрезов на склонах с развитием глубоких блоковых оползней (рис. 6).

Геологическая граница – поверхность отрыва **ДГС** обозначается и формируется по мере подготовки ДГС после проявления ее базиса. Грунтовый массив ДГС до момента нарушения предельного состояния находится в условиях допредельного деформирования (осадки) в границах "оболочки". Процесс отделения блока начинается с нарушения равновесия на горизонте базиса, в соответствии с уравнением (3), преодоления структурной прочности грунтов на этом горизонте и разрыва структурных связей вдоль всей оболочки ДГС. При этом исходная прочность грунтов и тектонические границы практически не оказывают влияния на образование разрыва сплошности по оболочке, как по центральному сечению (см. рис. 2, окружность с центром O_1), так и на всем протяжении ДГС-блока (в приведенном примере радиус кривизны блока около 180 м). При этом могут рассекаться и слои с прочными скальными грунтами, например, как это произошло на оползневом склоне в г. Одесса, где плоскость смещения блока рассекла прочные



Рис. 6. Геологический разрез оползня Соколовой горы в г. Саратов [2]. Валы сжатия в смещенных блоках, выявленные при бурении оползневого склона. 1 – юрские глины; 2 – барремские глинистые пески; 3 – барремские несмещенные глины; 4 – нижнеаптские несмещенные песчаники; 5 – смещенные нижнеапсткие песчаники; 6 – смещенные барремские глины; 7 – глинистые породы валов выдавливания (сжатия); 8 – нерасчлененные оползневые накопления; 9 – пески аллювиальные; 10 – пески с галькой (насыпной грунт); 11 – скважины; 12 – уровень воды водоносного горизонта со свободным зеркалом; 13 – уровень воды напорного горизонта; 14 – предполагаемый профиль склона до оползня; 15 – современный профиль склона.



Рис. 7. Геологический разрез оползневого склона в XII амфитеатре в Одессе, по П.Н. Науменко [3]. 1 – лессовидные породы; 2 – глины; 3 – известняки; 4 – глины песчанистые и прослойки песка. Поверхность склона и мэотиса в совмещенном профиле: 5 – до катастрофической подвижки; 6 – после катастрофической подвижки: 7 – предполагаемая граница оползневых смещений. dpQ_{IV} (Q + N₂pn + N₁m) – современные оползневые отложения; N₁m – четвертичные отложения; N₂³ – верхнеплиоценовые отложения; N₂pn – понтические отложения; N₁m – мэотические отложения.

понтические известняки мощностью около 10 м (рис. 7).

Следует отметить, что подобным образом проявляется геологическая граница после землетрясения, рассекая на большую глубину геологическую среду, не считаясь с рельефом, геологическим строением и тектоническими границами массивов на многие километры ее протяжения. Например, как при мощном землетрясении в Нефтегорске (27.05.1995 г., на севере о. Сахалин), где очаг землетрясения располагался вблизи поверхности и вышел на нее в виде системы разрывов общей протяженностью 40 км [1]. Приведенные примеры показывают, что образование диссипативных структур имеет геологические основы и является откликом геологической среды на локальное силовое возмущение, как в виде землетрясения (от его эпицентра), так и при подготовке оползневого блока.

Влияние прочности грунтов и гидрогеологических условий на формирование оползневых ДГС-блоков

Основное значение в создании условий для подготовки предельного состояния ДГС надоползневого уступа имеют свойства грунтов (γ , c_a , φ_a , $\sigma_{str,a}$) на глубине Z_a — горизонте базиса ДГС. Эти свойства учитываются при оценке состояния

массива в соответствии с уравнением (3). Прочность грунтов внутри ДГС на разных ее глубинах проявляется в значениях распорного давления, определяемых по закону Кулона-Мора с учетом структурной прочности по уравнению (2). Нарушение предельного состояния на горизонте базиса ДГС (глубина Z_a) вызывает разрушение структурных связей между минеральными частицами, слагающими грунт, по всей оболочке ДГС (т.е. $\sigma_{\text{stri}} = 0$). Дальнейшее движение грунтового массива ДГС – нового оползневого блока, происходит по схеме сдвига по оболочке с разрывом сплошности грунтов, т.е. как по подготовленной поверхности сдвига (схема "плашка по плашке").

На участке Хорошево, как указано выше, в уравнении (3) для оценки предельного состояния участвуют характеристики для глин оксфордского яруса юрской системы (глубина Z_a): $c = 47.2 \text{ кH/м}^2$; $\phi = 22^{\circ}$. После отделения нового блока (см. рис. 2, $\dot{\Pi}\Gamma C$ с центром O₁) происходит его оседание по схеме сдвига с оказанием давления на оползневой массив. расположенный ниже по склону. Таким образом, в оценке предельного состояния ДГС на момент, предшествующий отделению нового оползневого блока, используются данные о прочности грунтов, залегающих в коренном массиве на глубинах искомого базиса. На участке Хорошево была возможность сопоставить результаты расчетов с данными тензометрических и инклинометрических измерений. Фактически расчеты значений Z_a могут производиться на основе данных инженерных изысканий с использованием значений инженерно-геологических элементов и, как указано выше, уточняться в процессе исследований и по мере получения новой информации об объекте.

До активизации оползневого процесса на участке Хорошево уровень грунтовых вод (УГВ) по центральному створу находился на отметках 131.5-132.0 м (по данным инженерно-геологических исследований в 2004-2005 гг.). С образованием ДГС, но возможно до проявления трещины закола, произошел подъем УГВ, который отразился в обводнении канализационных дренажных колодцев, расположенных на территории Храма Животворящей Троицы и поселка в краевой части плато участка, вплоть до самоизлива воды (по описанию очевидцев). По центральному створу участка активизации оползневого процесса УГВ за пределами границы ДГС поднялся до отметки 134.0 м (см. рис. 2, индикатор A), т.е. на 2 м. Внутри ДГС значение УГВ оставалось 131.6-132.0 м (индикатор В), т.е. приток грунтовых вод прервался. Возникновение трещины закола и соответственно оболочки ДГС не вызвало понижения УГВ на площадке плато. Оболочка ДГС – это, как указано выше, несущая конструкция новой структуры, в которой концентрируются напряжения, на два порядка превышающие распорное давление в точке. Высокие значения напряжений в оболочке ДГС блокируют движение подземных вод в сторону падения склона, создавая их подъем у границы ДГС (у центрального створа) и поворот потоков вдоль граничной поверхности ДГС к ее бортам (где нередко образуются эрозионные врезы).

выволы

Образование нового оползневого блока происходит как развитие диссипации в коренном массиве — защитной реакции геологической среды на локальное силовое возмущение различного генезиса. Диссипативные изменения напряженно-деформированного состояния в коренном массиве протекают как геологический процесс, в результате которого формируются диссипативные геологические структуры (ДГС), и на их основе происходит образование и смещение оползневого блока.

Рассмотрены следующие геологические закономерности. которые являются результатом функционирования ДГС:

- образование в массиве новых крупных структур – ДГС, с появлением базиса диссипации, граничных поверхностей (оболочек) и формированием в этом замкнутом пространстве НДС, отличного от НДС вмещающего массива;

формирование граничных поверхностей. отделяющих ДГС от окружающего массива и связующих ДГС между собой, в том числе с оползневым ранее смещенным блоком;

 преобразование ДГС в оползневой блок по достижении предельных значений напряжений в оболочке ДГС на горизонте ее базиса в соответствии с уравнением предельного состояния (3), учитывающим величины вертикального давления в оболочке в коренной и смещенной частях ДГС и исходное значение структурной прочности грунтов на уровне ее базиса;

 подготовка и смещение оползневого ДГСблока сопровождаются проявлением характерных геологических признаков оползневого пропесса:

• отделение блока с образованием геометрически правильной граничной поверхности (в сечении по центральному створу – окружности), секущей грунтовую толщу от дневной поверхности до базиса ДГС;

• возникновение трещин (трещина закола, поднятая трещина сжатия) в результате выхода границ ДГС на дневную поверхность;

• образование в смещенном блоке характерных элементов в рельефе и разрезе: провалов (грабенов), валов сжатия; изменение исходных гидрогеологических условий в связи с образованием подпора с внешней границы ДГС.

Анализ геологических закономерностей преобразования возникающих в массиве ДГС в оползневой блок позволяет установить границы ДГС, произвести оценку предельного состояния коренного массива, разработать модели развития оползневого процесса, схемы мониторинга для предупреждения разрушительных деформаций и рекомендации по защитным мероприятиям.

Вместе с тем отметим, что необходимо продолжить дальнейшие исследования функционирования диссипативных геологических структур в геологической среде с целью выявления новых закономерностей их развития при подготовке разрушительных оползневых деформаций и разработки способов и средств их предотвращения или минимизации последствий.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме № г.р. АААА-А19-119021190077-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Короновский Н.В.* Общая геология. Учеб. М.: КДУ, 2006. 561 с.

- Кюнтцель В.В. Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР и его региональный прогноз. М.: Недра, 1980. 213 с.
- 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. Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней // Инженерная геология. 2018. Т. XIII. № 3. С. 54–61.
- 5. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. 2020. № 6. С. 22–31.
- 6. *Тихвинский И.О.* Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 144 с.
- 7. *Nicolis, G., Prigogine, I.* Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. New York: J. Wiley & Sons, 1977.

GEOLOGICAL REGULARITIES OF FORMATION OF DISSIPATIVE GEOLOGICAL STRUCTURES – LANDSLIDE BLOCKS

G. P. Postoev^{a,#}, A. I. Kazeev^a, and M. M. Kuchukov^a

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

Side-thrust stress (depending on the weight of the above-lying strata and the soil strength at the point), is formed in the geological environment (in the Earth's gravitational field) in each point of the soil mass according to the Pascal and Mohr–Coulomb laws. A local force impact on a landslide-prone mass by geological processes (landslides, erosion, abrasion, etc.) results in an intense stress discharge in the bedrock massif adjacent to the slope and in the formation of dissipative geological structures (DGS). The features of the geological structure of the bedrock massif has no effect on the DGS manifestation, as well as DGS functioning under the limit state and the processes of separation and displacement in the form of a landslide block. Geological features are manifested through: the formation of new geological boundaries (envelopes) of DGSs, which divide the existing structures and tectonic faults (like cracks produced by earthquakes); the barrage effect in ground water within the bedrock massif in front of DGS; the formation of specific compression folds and grabens; as well as the specific changes in stress-strain state and properties of soils along the envelope of future displacement surface at different transformation stages of DGS into a landslide block.

Keywords: geological regularities, dissipative geological structures, geological processes, landslide basis, limit state, landslide block, geological structures

REFERENCES

- 1. Koronovskii, N.V. *Obshchaya geologiya* [General geology]. Ucheb. Moscow, KDU Publ., 2006, 561 p. (in Russian)
- 2. Kyunttsel', V.V. Zakonomernosti opolznevogo protsessa na Evropeiskoi territorii SSSR i ego regional'nyi prognoz [Regularities of the landslide process in the European territory of the USSR and its regional forecast]. Moscow, Nedra, 1980, 213 p. (in Russian)
- Naumenko, P.N. Usloviya formirovaniya i inzhenernogeologicheskaya 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. Moscow, Nedra, 1977, pp. 57– 100. (in Russian)
- 4. Postoev, G.P. *Dissipativnye struktury v gruntovom massive na primere formirovaniya glubokikh opolznei* [Dissipative structures in soil massif by the example of deep landslides formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, vol. XIII, no. 3, pp. 54–61. (in Russian)
- Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Fizicheskie zakony raspredeleniya davleniya v geologicheskoi srede* [Physical laws of pressure distribution in the geological environment], *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 22– 31. (in Russian)
- 6. Tikhvinskii, I.O. *Otsenka i prognoz ustoichivosti opolznevykh sklonov* [Assessment and forecast of the stability of landslide slopes]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 144 p. (in Russian)
- 7. Nicolis, G., Prigogine, I. Self-organization in non-equilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations. New York: J. Wiley & Sons, 1977.