

ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ НА ПРИМЕРЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ОПОЛЗНЕЙ

DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-54-61

УДК 551.3:624.13

**ПОСТОВЕ Г.П.***Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия, opolzen@geoenv.ru*

Аннотация

В исходном напряженном состоянии грунтового массива с возникновением локального силового возмущения (подготовка оползня, провала над полостью — с ослаблением напряжений) создаются диссипативные структуры (в соответствии с теорией Нобелевского лауреата И.Р. Пригожина). В коренном массиве (в открытой неупорядоченной системе в отношении напряженного состояния) возникают процессы самоорганизации, заключающиеся в перестройке напряженного состояния в прилегающей к оползневому очагу зоне. Происходит процесс диссипации с образованием диссипативных структур в виде блоков-получилиндров, в нижней части включающих потенциально деформируемый горизонт (в соответствии с исходными инженерно-геологическими характеристиками массива и параметрами оползня) — базис оползания. Границы по контуру блоков формируются в виде поверхностей напряженности, при этом не происходит нарушения естественного сложения грунтовой толщи в границах выделяемых блоков. Соответствующие преобразования в коренном массиве происходят только в поле напряжений без разрушительного деформирования и разрыва сплошности грунтов. Границы между блочными структурами проявляются в поле напряжений. Перестройка напряженного состояния в массиве заключается в концентрации напряжений по границам блоков. Распорное давление в каждой точке грунта внутри блока полностью передается на границы — виртуальные оболочки. В соответствии с решениями Лапласа для осесимметричных тонкостенных оболочек, нормальные меридиональные напряжения по границе блока (в «оболочке») на глубине Z_i могут в десятки раз превышать распорное давление грунта внутри блока на этой глубине. Изменение состояния и устойчивости блока, примыкающего к оползневому массиву, происходит в процессе оседания (оползневом смещении) грунтовых масс верхней части склона до уровня оползневой террасы. При этом достигается критическое значение высоты надоползневого уступа и предельное состояние блока. В дальнейшем блок становится оползневым, отделяется и оседает по тыловой его границе (оболочке). Установлено, что оценку предельного состояния и анализ изменения напряженно-деформированного состояния необходимо производить с учетом преобразования исходного напряженного состояния в диссипативные структуры. Разработана технология выявления и расчета диссипативных структур-блоков при подготовке и развитии глубоких оползневых подвижек.

Ключевые слова:

поле напряжений; закон Кулона-Мора; диссипативные структуры-блоки; предельное состояние; оползневой блок

Ссылка для цитирования:

Постоев, Г.П., 2018. Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней. Инженерная геология, Том XIII, № 3, с. 54–61. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-54-61.

DISSIPATIVE STRUCTURES IN THE SOIL MASSIF ON THE EXAMPLE OF THE FORMATION OF THE DEEP LANDSLIDES

POSTOEV G.P.

Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, Moscow, Russia, opolzen@geoenv.ru

Abstract

Dissipative structures are formed in the initial stressed state of a soil mass with the appearance of local force disturbances (during landslide preparation, dip over the cavity — with stress weakening) (according to the theory of the Nobel Prize winner I.R. Prigogine). The processes of self-organization, that consist of the rearrangement of the stressed state in the zone adjacent to the landslide site, are formed in the bedrock an open disordered system with respect to the stressed state. The dissipation develops with the formation of dissipative structures in the form of blocks - half cylinders, which in a lower part include potentially deformable horizon (in accordance with the initial engineering — geological characteristics of the mass and the landslide parameters) — the landslide basis. The boundaries along the contour of blocks are being formed as stress surfaces, whereas there is no disruption of the natural soil structure within the boundaries of distinguished blocks. Corresponding restructuring of the bedrock occur only in the stress field, without destructive deformation and rupture of soil. The boundaries between blocky structures appear in the stress field. The rearrangement of the soil stress state is represented in the concentration of stresses along the boundaries of the blocks. The active (thrust) pressure in each point of the soil inside the block is entirely transferred to the boundaries — virtual shells. In accordance with Laplace's solutions for axisymmetric thin-walled shells, the normal meridional stresses along the boundaries of the block (in the «shell») at a depth Z_i could be several times higher than the active soil pressure inside the block at this depth. The change of the state and stability of the block adjoining to the landslide massif takes place during the settling (landslide displacement) of the soil masses of the upper part of the slope to the level of the landslide terrace. Herewith the critical value of the height of the native ledge and the limit state of the block are achieved. Subsequently the block becomes a landslide. It separates and settles at its back boundary (along the shell). It was determined that the estimation of the limit state and the analysis of the stress-strain state changes should be done with respect to the transformation of the initial stress state into the dissipative structures. The technology has been developed for revealing and assessing the dissipative blockstructures in the preparation and development of deep landslide movements.

Key words:

stress field; the Coulomb-Mohr criterion; dissipative structures-block; the limiting state; landslide block

For citation:

Postoev, G.P., 2018. Dissipative structures in the soil massif on the example of the formation of the deep landslides. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 3, pp. 54–61. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-54-61.

Введение

Выявление механизма и прогнозирование таких уникальных явлений как возникновение и катастрофическая активизация глубоких блоковых оползней, образование провалов земной поверхности над подземными полостями и других подобных процессов, где в движение вовлекаются огромные массивы грунтовой толщи, имеют большое научное и практическое значение. На участках развития глубоких блоковых оползней, представляющих наибольшую опасность для сооружений во многих городах России, в том числе и в Москве (15 участков с развитием глубоких оползней), периодически происходят катастрофические активизации оползневого процесса с образованием новых оползневых блоков. Огромную опасность представляют оползни в карьерах. Известно, что при средней глубине железорудных карьеров 100 м оползни имели место на 50% предприятий, а при достижении средней глубины 200 м — уже на 80%. Нередки катастрофические оползни объемом до 120–140 млн. м³ [1].

Существующие подходы к расчету напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива при силовом воздействии на него в виде разгрузки напряжений в локальной его зоне (на горизонте формирования

поверхности оползневого смещения, над подземной полостью и т.п.) нередко оказываются недостаточно эффективными.

Возникает необходимость совершенствования теоретических решений по оценке предельного состояния грунтовых массивов при подготовке разрушительных деформаций. Это касается анализа роли в формировании разрушительных подвижек грунтовых массивов изменения напряженного состояния, прочности грунтов, гидрогеологических условий и других факторов, определяющих реакцию массива на силовое возмущение и особенности механизма разрушения.

Теория И.Р. Пригожина

В 1977 г. бельгийский ученый русского происхождения Илья Романович Пригожин получил Нобелевскую премию по химии «за работы по термодинамике необратимых процессов и прежде всего за создание «теории диссипативных структур». Теория разрабатывалась И.Р. Пригожиным применительно к процессам, изучаемым физикой и химией. Однако в дальнейшем она получила распространение и в других отраслях научного познания. Под диссипацией понимается неравномерность распре-

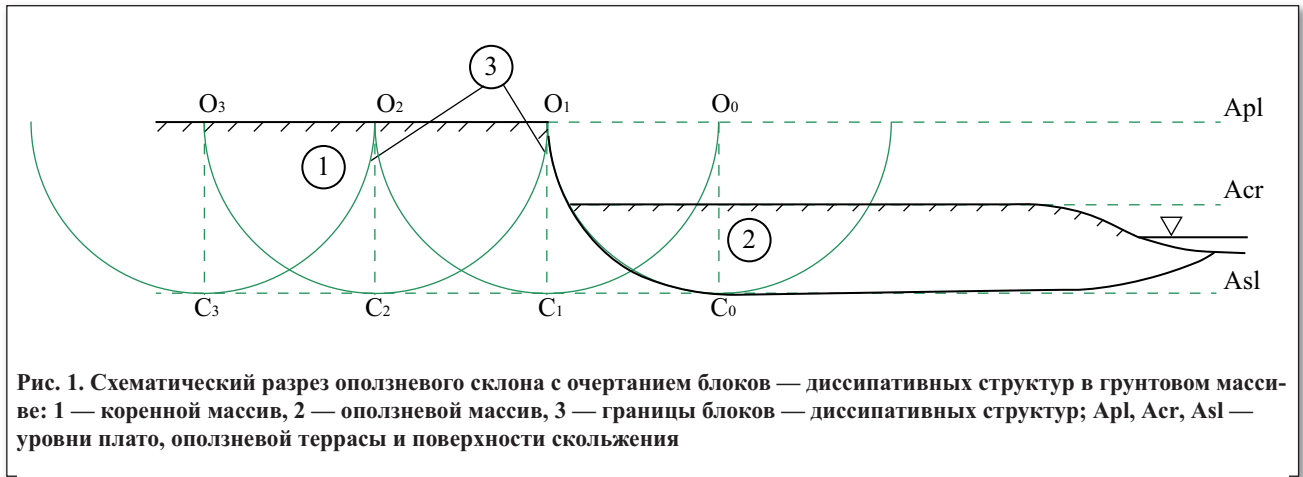


Рис. 1. Схематический разрез оползневого склона с очертанием блоков — диссипативных структур в грунтовом массиве: 1 — коренной массив, 2 — оползневой массив, 3 — границы блоков — диссипативных структур; Apl, Acr, Asl — уровни плато, оползневой террасы и поверхности скольжения

деления энергии в пространстве физических систем, рассеивания ее в окружающую среду. Диссипативные структуры образуются в неравновесных системах в процессе их самоорганизации при обмене энергией и массой с окружающей средой. При этом диссипативные структуры поддерживают себя в устойчивом состоянии далеко от равновесия.

Примером диссипативных структур могут служить ячейки Бенара, открытые вначале прошлого века французским физиком Анри Бенаром. При равномерном подогреве снизу тонкого однородного слоя вязкой жидкости в определенный момент прогревания происходит образование ячеек цилиндрической или шестигранной формы. Внутри ячеек горячая жидкость поднимается вверх по центру, а более холодная опускается по краям ячейки. Здесь управляющим параметром самоорганизации (процессов спонтанного упорядочивания) служит градиент температуры. Неравновесное состояние жидкости создается непрерывным потоком тепла, в результате чего происходит самоорганизация системы и образование упомянутых ячеек [3, 8, 10].

Грунтовый массив как система

Грунтовый массив как геологическое образование (включая структуру массива, строение, состав и свойства грунтов, тектонические нарушения) представляет собой устойчивую систему, изменения в которой происходят чрезвычайно медленно. В то же время грунтовый массив находится в поле напряжений под действием гравитации Земли. Естественное напряженное состояние (НС) массива с горизонтальной дневной поверхностью (или на глубинах, где напряженное состояние не зависит от поверхностных сил) создается собственным весом грунтов и характеризуется на i -ом горизонте тремя главными напряжениями: вертикальным $\sigma_{ii} = \gamma Z_i$ и двумя горизонтальными σ_{3i} и σ_{2i} .

В развитии оползневой массы, в частности блоковых оползней сжатия-выдавливания, выделяются характерные периоды (стадии и фазы) в течение оползневой массы. На заключительном этапе смещения блока образуется оползневая терраса, когда оползневые блоки создают на склоне единую ступень. При этом создается критическая ситуация по устойчивости коренного массива надоползневой уступа (рис. 1). Возникает предельное состояние в указанном массиве, в дальнейшем образуется трещина закола, и формируется поверхность скольжения нового оползневой блока.

Коренной массив (1) на удалении от склона (т.е. при отсутствии влияния внешнего силового воздействия на массив) можно считать относительно равновесной системой (подобно однородному слою вязкой жидкости в опытах Бенара). На горизонтах массива, где вертикальное давление $\sigma_{ii} = \gamma Z_i$ от веса вышележащей толщи грунта превышает структурную прочность грунта $\sigma_{str,i}$ (предельное давление на грунт при одноосном сжатии) возникают горизонтальные главные напряжения распора $\sigma_{3i} = \sigma_{2i} = (\sigma_{ii} - \sigma_{str,i}) \operatorname{tg}^2(45 - \phi/2)$ нормальные друг к другу. В точке имеет место равновесие между распором и отпором. Эти соотношения вытекают из закона Кулона-Мора [6]:

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

На произвольной площадке в массиве на глубине Z_i напряжения распора (при $\gamma Z_i > \sigma_{str,i}$) в точках площадки направлены хаотично (рис. 2), внося беспорядок в исходное состояние массива как открытой системы.

Влияние оползневой массы можно рассматривать как внешнее локальное силовое возмущение, вызывающее разгрузку горизонтальных напряжений отпора, противодействующих активным напряжениям распора в прилегающем к склону коренном массиве (соответствует температурному нагреву водного слоя в опытах Бенара). В коренном массиве возникают процессы самоорганизации, заключающиеся в перестройке НС в прилегающей к оползневой массе зоне, с развитием диссипации по мере удаления от оползневой массы и образованием диссипативных структур в виде блоков-полуцилиндров. Каждый из блоков в нижней точке по центральному сечению (см. рис. 1) находится в грунтах потенциально деформируемого горизонта — базиса оползания (в соответствии с исходными инженерно-геологическими характеристиками массива и параметрами оползня). На i -ом горизонте оползнеопасного коренного массива возникают силовые и эквипотенциальные линии, и происходит ориентация по ним горизонтальных напряжений. В связи с самоорганизацией (перестройкой) напряженного состояния с выделением в массиве виртуальных границ, определяющих специфические диссипативные структуры, происходит упорядочение напряженного состояния (рис. 3) и, соответственно, снижение энтропии в локальной зоне коренного массива.

Границы по контуру блоков формируются в виде поверхностей напряженности, при этом не происходит нарушения естественного сложения грунтовой толщи в границах выделяемых блоков, что выявляется при анализе геологиче-

ского строения отделяемых оползневых блоков (рис. 4). Соответствующие преобразования в коренном массиве происходят только в поле напряжений без деформирования и разрыва сплошности грунтов. Границы между блочными структурами проявляются в поле напряжений подобно волнам цунами, расходящимся в океане от эпицентра землетрясения на глубине. В нашем случае длина «волны» — радиус блока (глубина до поверхности скольжения), у волн цунами — длина, по-видимому, соответствует глубине океана над эпицентром и может составлять сотни метров.

Оценка предельного состояния оползнеопасного массива

Для коренного оползнеопасного массива в верхней части оползневой очага с развитием блочных оползней типа сжатия-выдавливания получено уравнение предельного равновесия [6, 7]:

$$\sigma_{\gamma a} - \sigma_{str} = \frac{\frac{\pi}{2} - \beta}{1 - \sin \beta} \sigma_{\gamma p} \frac{1 + \frac{1}{R}}{1 - \frac{1}{R}}, \quad (2)$$

где в дополнение к известным обозначениям и рис. 5: R — радиус изгиба бровки очага в плане, в котором оценивается состояние массива 1 (см. рис. 5), примыкающего к бровке; β — угол отклонения радиуса изгиба бровки уступа рассматриваемого сечения массива от центрального створа в оползневом очаге.

В условиях плоской задачи (для протяженных уступов, центрального створа очага с кривизной изгиба бровки близкой к нулю, $\beta = 0$) уравнение предельного состояния с возможным развитием основных оползневых деформаций на i -ом горизонте исследуемого массива склона (откоса) имеет вид [7]:

$$\gamma_i Z_{ai} - \sigma_{str,i} = \frac{\pi}{2} \gamma_i Z_{p,cr}, \quad (3)$$

где γ_i — средний удельный вес грунтов, залегающих над i -м горизонтом в оползнеопасном коренном массиве (см. рис. 5); Z_{ai} — глубина до i -го горизонта в коренном массиве, $\sigma_{1a} = \gamma_i Z_{ai}$; $\sigma_{str,i}$ — структурная прочность грунта i -го горизонта коренного массива; $Z_{p,cr}$ — критическая (расчетная) глубина до потенциально деформирующегося i -го горизонта в массиве склоновых отложений, пригружающих исследуемую часть массива ($\sigma_{1pi} = \gamma_i Z_{pi}$ — вертикальная фактическая нагрузка на i -ый горизонт); a и p — индексы, характеризующие соответственно зоны формирования активного (в коренном массиве) и относительно пассивного (в оползневом массиве) горизонтальных давлений на i -ом горизонте.

Результаты теоретических расчетов проверены на большом количестве реальных событий с проявлениями предельного состояния оползнеопасных коренных грунтовых массивов и последующим развитием в них массивных оползневых блоков [7].

На основании уравнения (3) можно определить величину Z_a (глубину до поверхности скольжения на участке оползневой террасы по центральному створу очага) [4].

Оползневые блоки — диссипативные структуры

Рассмотрим НДС массива в указанной зоне по центральному створу оползневой очага в соответствии с рис. 1, 6 и 7. Поверхности (линии на разрезе) concentra-

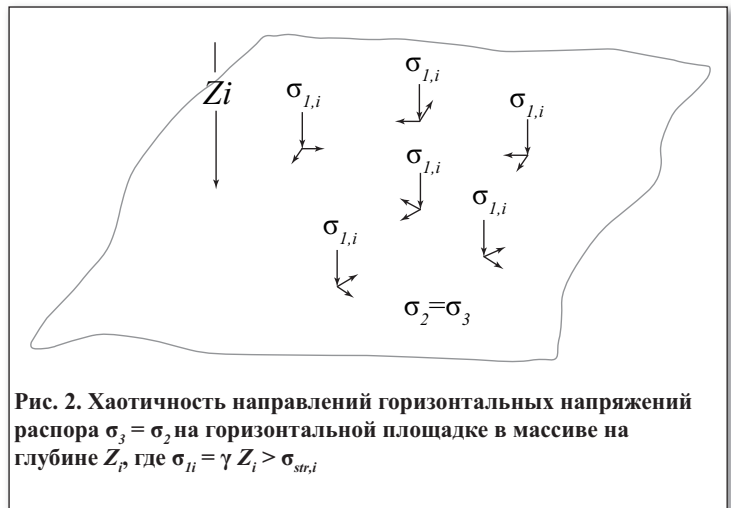


Рис. 2. Хаотичность направлений горизонтальных напряжений распора $\sigma_3 = \sigma_2$ на горизонтальной площадке в массиве на глубине Z_i , где $\sigma_{ii} = \gamma Z_i > \sigma_{str,i}$



Рис. 3. Ориентация горизонтальных главных напряжений σ_2 и σ_3 по силовым и эквипотенциальным линиям на горизонте Z_i : 1 — на площадке, 2 — в точке (единичном отрезке кривой эквипотенциальной линии); a — зона исходного коренного массива; P — зона силового возмущения; 1 — силовые линии; 2 — эквипотенциальная линия; σ_{1a} — вертикальное наибольшее, σ_{2a} и σ_{3a} — горизонтальные соответственно среднее и наименьшее главные напряжения отпора

ции напряжений по границам блоков (диссипативных структур) можно представить, как тонкостенные осесимметричные оболочки с единичной толщиной. Блок в виде полуцилиндра расположен по протяжению ширины оползневой очага, параллельно бровке склона. Для определения напряжений в оболочке блока можно использовать уравнения Лапласа [5, 7]:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{h}, \quad (4)$$

где σ_m и σ_t — соответственно меридиональное (по окружности сечения) и широтное (по длине цилиндра) нормальные напряжения в оболочке; ρ_m и ρ_t — соответственно меридиональный и широтный радиусы кривизны; p — внутреннее давление на тонкую оболочку в блоке и h — толщина условной оболочки.

Вертикальное давление грунта на глубине Z_i равно $\sigma_{ii} = \gamma Z_i$. В соответствии с законом Кулона-Мора, внутреннее давление на оболочку определится из выражения для напряжения распора:

$$p = \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_{str}) \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2), \quad (5)$$

Меридиональный радиус кривизны ρ_m равен глубине Z_a (радиус цилиндра). Широтный $\rho_t = \infty$ (радиус кривизны

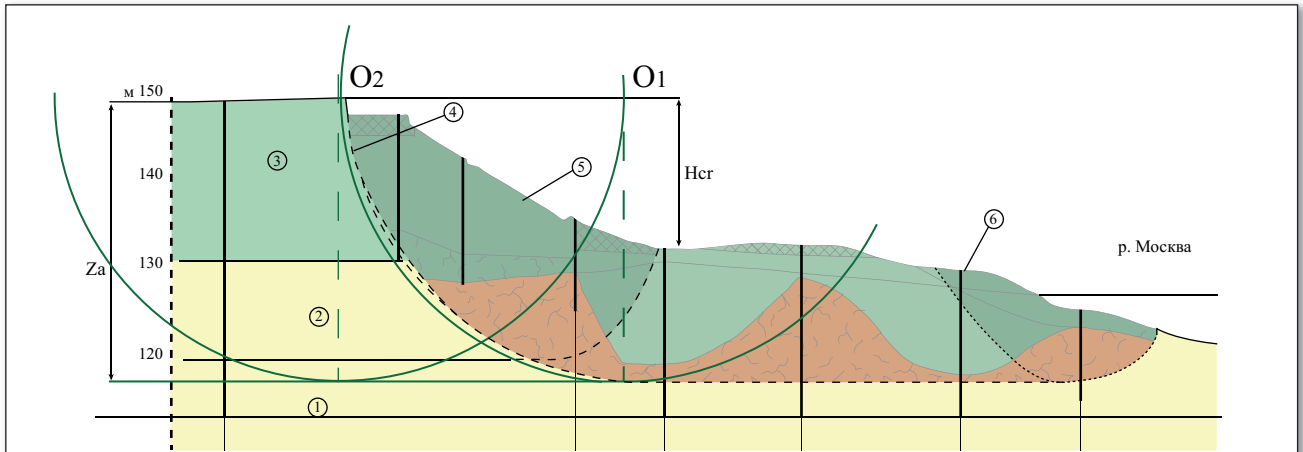


Рис. 4. Схематический инженерно-геологический разрез по центральному створу очага смещения нового оползневой блока на оползневом участке Хорошево (Москва): 1 и 2 — соответственно глины волжского и оксфордского ярусов юрской системы, 3 — пески четвертичных отложений, 4 — поверхность скольжения, 5 — тело оползня; 6 — скважина; границы блоков показаны зелеными линиями

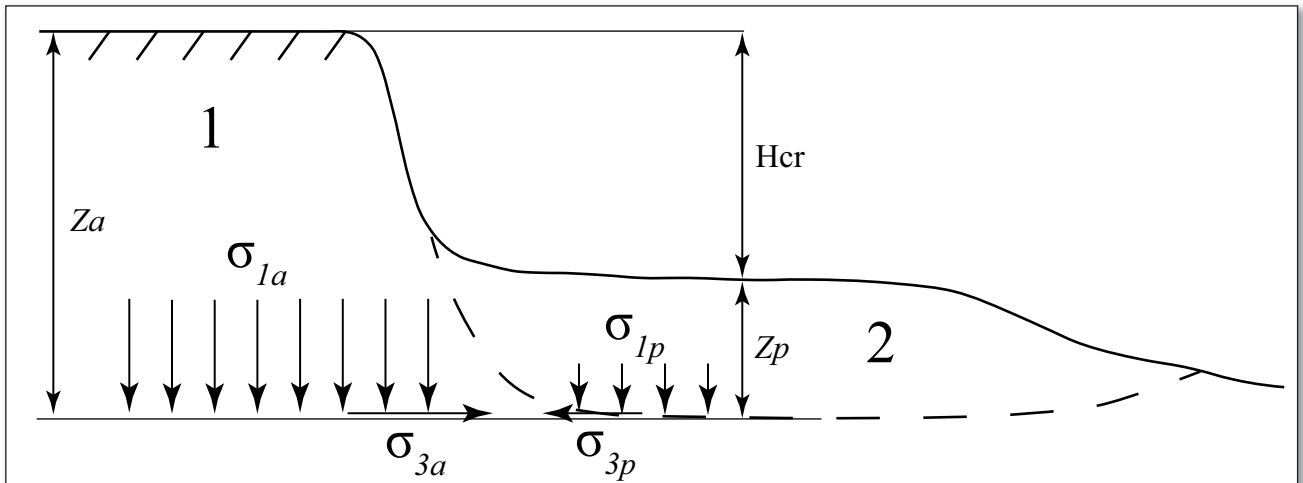


Рис. 5. Схема к оценке состояния грунта горизонта массива на глубине Z_a : 1 — исследуемый массив-1 (активная зона); 2 — массив-2 склоновых отложений, примыкающий к массиву-1 снизу (пассивная зона)

по образующей цилиндра можно принять равным бесконечности); $h = 1$. Подставляя полученные значения в (4), получим для точки М (см. рис. 6, 7) значение для напряжения в оболочке:

$$\sigma_M = p_M Z_a = (\gamma Z_M - \sigma_{str,M}) Z_a \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2), \quad (6)$$

где γ — удельный вес грунта в блоке, а $Z_M = Z_a \cos \alpha$.

Из выражения (6) следует, что напряжения в оболочке (по границе блока) в Z_a раз больше внутреннего распорного давления на рассматриваемой глубине Z_M блока. То есть основная концентрация напряжений происходит по границам блока, в виртуальной оболочке.

В точке С наибольшие напряжения в оболочке блока:

$$\sigma_C = (\gamma Z_a - \sigma_{str,C}) Z_a \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2). \quad (7)$$

В первую очередь предельное состояние формируется в блоке, примыкающем к оползневой террасе, с центром O_2 на плато (см. рис. 6). Напряжение в оболочке в точке C_2 определяется по формуле (7). В оползневом бло-

ке, примыкающем к надоползневому уступу, с центром окружности оболочки блока в точке O_1 напряжение в нижней точке определится в соответствии с размерами сегмента, отсекаемого оползневой террасой на уровне A_{cr} , и отсутствия структурной прочности в оболочке блока и оползневых массах на заключительном этапе оползневой цикла по следующему выражению:

$$\sigma_{Cl} = \gamma Z_p Z_a \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2). \quad (8)$$

Условие равновесия между оползневой блоком и блоком надоползневого уступа с учетом центрального створа очага, т.е. наличия коэффициента $\pi/2$, принимает вид уравнения (3), или, после деления составляющих на величину γ , получим:

$$Z_a - \frac{\sigma_{str}}{\gamma} = \frac{\pi}{2} \gamma Z_{p,cr}, \quad (9)$$

где $Z_{p,cr}$ — критическое значение мощности оползневой тела.

Таким образом, выражение (9) полностью совпадает с уравнениями предельного состояния надоползневого уступа, полученными ранее [5, 6]. Изменение состояния

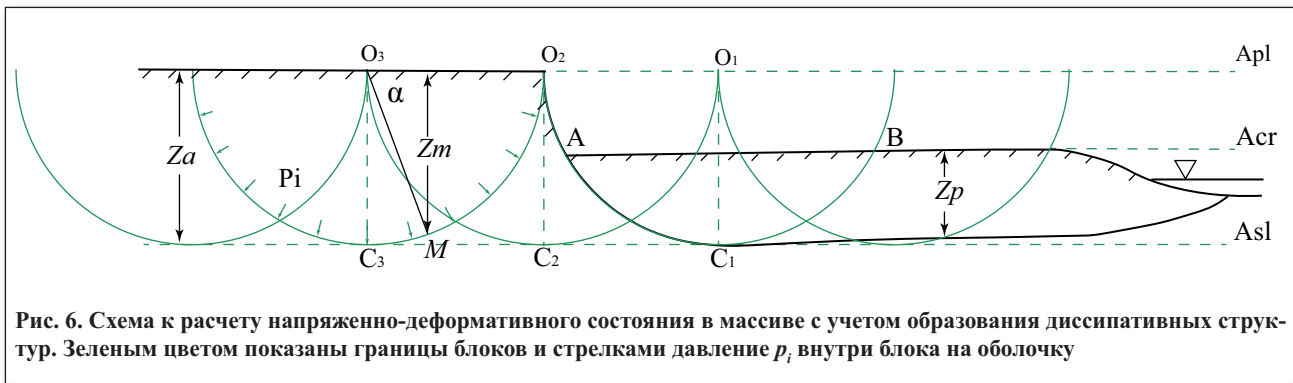


Рис. 6. Схема к расчету напряженно-деформативного состояния в массиве с учетом образования диссипативных структур. Зеленым цветом показаны границы блоков и стрелками давление p_i внутри блока на оболочку

и устойчивости блока происходит в процессе снижения веса фронтальной части блока при оседании площадки $O_1 O_2$ до уровня оползневой террасы Acr , когда достигается предельное состояние по условию (9). В дальнейшем блок отделяется и оседает по тыловой его границе (оболочке). При этом предельное состояние в первую очередь достигается и нарушается в нижней части блока. При дальнейшей разгрузке напряжений и податливости фронтальной его части снижается внутреннее давление в грунтовой массе, возникает разрыв сплошности по оболочке (материальная граница отделения), и деформирование грунтовых масс внутри блока переходит в режим одноосного сжатия с раздавливанием нижних горизонтов и образованием валов сжатия-выдавливания на участке контакта с оползневой террасой. Проседание отделившихся блоков в начальный период оползневого смещения может составлять десятки метров [2, 9].

Согласно проведенным расчетам, на оползневом участке Воробьевы горы (Москва) максимальная глубина до горизонтальной поверхности скольжения оползневого массива (по центральному створу) составляет около 100 м. Соответственно ширина блока может достигать 200 м, а давление в оболочке блока в 100 раз превышать распорное давление грунтов внутри блока.

Заключение

В механике грунтовых массивов возникают особенности, связанные с образованием диссипативных структур в поле напряжений массива при воздействии на него локального силового возмущения, которые могут внести существенные коррективы в расчетные процедуры по оценке напряженно-деформированного состояния массива. В расчетных технологиях может возникнуть необходимость уточнения механизма разрушения массива (в виде блоков), а также роли напряжений, свойств грунтов, геологического строения, гидрогеологических условий и других природных и техногенных факторов. При этом можно отметить следующее:

- закономерности формирования и изменения напряженного состояния (НС) грунтовых массивов базируются на законе прочности грунтов Кулона-Мора в главных напряжениях (наибольшего вертикального σ_1 и наименьшего горизонтального σ_3), с учетом структурной прочности σ_{str} :

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

- грунтовый массив с горизонтальной дневной поверхностью, с распределением напряжений от собственного веса, в исходном состоянии (при от-



Рис. 7. Схема к расчету напряжений в оболочке блока — элемента диссипативных структур в грунтовой массе вблизи оползневого очага

сутствии силовых возмущений) представляет собой открытую систему. Имеется достаточно четкая упорядоченность системы в том, что касается геологического строения, литологических границ между слоями, изменчивости свойств грунтов в массиве. Однако в напряженном состоянии проявляются некоторые признаки хаоса. Действительно, с одной стороны, вертикальные напряжения на глубине Z_p , где $\sigma_{1i} = \gamma Z_i$ одинаковы, и в целом массив представляет собой устойчивое образование без каких-либо аномалий напряженного состояния. Однако с другой стороны, на каждом горизонте массива горизонтальные главные напряжения, взаимно перпендикулярные и равные между собой $\sigma_{2i} = \sigma_{3i}$, в разных точках ориентированы хаотично. В этом отношении энтропия как мера беспорядка и хаоса в системе приобретает значение близкое к максимальному;

- в соответствии с теорией диссипативных структур Ильи Романовича Пригожина, влияние оползневого очага можно рассматривать как внешнее локальное силовое возмущение на коренной массив. Происходит изменение НС посредством разгрузки горизонтальных напряжений отпора со стороны склона, противодействующих активным напряжениям распора (соответствует температурному нагреву водного слоя в опытах Бенара). В исходном коренном массиве (в открытой неупорядоченной системе в отношении напряженного состояния) возникают процессы самоорганизации. Они заключаются в перестройке напряженного состояния в прилегающей к оползневому очагу зоне с образованием диссипа-

тивных структур в виде блоков-получилиндров в нижней части, включающих потенциально деформируемый горизонт (в соответствии с исходными инженерно-геологическими характеристиками массива и параметрами оползня) — расчетный базис оползания;

- границы по контуру блоков формируются в виде поверхностей напряженности, при этом не происходит нарушения естественного сложения грунтовой толщи в пределах выделяемых блоков, что выявляется при анализе геологического строения вовлекаемых в смещение массивов. Соответствующие преобразования в коренном оползнеопасном массиве происходят только в поле напряжений без деформирования и разрыва сплошности грунтов. Границы между блочными структурами проявляются и распространяются в поле напряжений (подобно волнам цунами, расходящимся в океане от эпицентра землетрясения на глубине). В нашем случае длина «волны» — радиус блока (глубина до поверхности скольжения);
- перестройка напряженного состояния в массиве заключается в концентрации напряжений по границам блоков. Распорное давление в каждой точке грунта внутри блока полностью передается на границы — виртуальные оболочки. В соответствии с решениями Лапласа, для осесимметричных тонкостенных оболочек нормальные напряжения по граничной поверхности блока (в «оболочке») могут в десятки раз превышать прочность грунта внутри блока в точке. Согласно проведенным расчетам, на оползневом участке Воробьевы горы (Москва) максимальная глубина до горизонтальной поверхности скольжения оползневой массы (по центральному створу) составляет около 100 м. Соответственно ширина блока может достигать 200 м, а давление в оболочке блока в 100 раз превышать распорное давление грунтов внутри блока.

Таким образом, прочность (устойчивость) грунта в оползнеопасном массиве определяется состоянием образующих структур и характером силового возмущения (в данном случае — влияния оползневого очага). Отделение массива блока происходит по ровной сферо-цилиндрообразной поверхности (виртуальной оболочке блока), рассекая массив как сплошную среду, не считаясь с неоднородностями геологического строения. При этом сохраняется исходное строение массива в верхней части блока и раздавливаются грунты нижних горизонтов с образованием валов выдавливания-выпора;

- образование диссипативных структур в грунтовой массе при локальном силовом возмущении раз-

личного вида и преобразование исходного напряженного состояния, как реакции на внешнее воздействие, являются фундаментальными закономерностями формирования специфического напряженно-деформированного состояния, обуславливающего процессы распределения напряжений и развития деформаций в массиве, в том числе разрушительного характера:

- для оползней, захватывающих глубокие горизонты грунтовой массы, характерно образование диссипативных структур в виде блоков — цилиндров с распространением «волны» — радиуса цилиндра, длиной, равной глубине до поверхности скольжения смещаемых оползневых блоков;
- при образовании провала в массиве над полостью (карстовой пещерой, подземной выработкой, полостью в пласте льда и т.п.) также должно происходить образование диссипативных структур. По-видимому, диссипативные структуры в НС массива в зоне полости могут выглядеть в виде полусферических сводов в поле напряжений с возрастанием их диаметра по мере удаления от полости на величину расчетного диаметра провала в соответствии с глубиной размещения полости и геологическим строением покрывающей толщи [7];
- под фундаментом сооружения от давления техногенной нагрузки также происходит самоорганизация напряженного состояния массива. Под подошвой фундамента возникает ядро (в виде полусферы или цилиндра). Влияние ядра на соседние зоны массива также может происходить в виде соответствующих диссипативных структур (как волны цунами), которые необходимо изучать для совершенствования технологии расчета осадок и устойчивости сооружений;
- в подготовке и возникновении разрушительных деформаций грунтовой массы необходимо учитывать образование диссипативных структур и механизм преобразования виртуальных границ диссипативных структур в напряжениях в поверхности отделения потерявших устойчивость массивов (блоков) и их оседания (обрушения) без проявления возможных контактных силовых взаимодействий сдвигового характера (оседание оползневых блоков на десятки метров с обнажением ровной криволинейной поверхности отделения; обрушение цилиндрических столбов в подземные полости и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин, А.М., 2009. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. ГЕОС, М.
2. Иванов, И.П., 1987. Инженерно-геологические исследования в горном деле. Недра, Л.
3. Николис, Г., Пригожин, И., 1979. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. Мир, М.
4. Постоев, Г.П., Казеев, А.И., 2011. Патент на изобретение № 2412305. Способ определения глубины заложения в оползнеопасном коренном массиве потенциально деформирующегося горизонта. 20.02.2011. Бюл. № 5.

5. Писаренко, Г.С., Агарев, В.А., Квитка, А.Л., Попков, В.Г., Усманский, Э.С., 1973. Сопротивление материалов, под ред. Писаренко Г.С., 3-е изд. Вища школа, Киев.
6. Постоев, Г.П., 2010. Уравнения состояния массива при формировании оползней. Инженерная геология. № 4, с. 48–53.
7. Постоев, Г.П., 2013. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). Нестор-История, М., СПб.
8. Пригожин, И.Р., Стенгерс, И., 2003. Порядок из хаоса. Едиториал УРСС, М.
9. Тихвинский, И.О., 1988. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. Наука, М.
10. Prigogine, I., Nicolis, G., 1977. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. J. Wiley & Sons, New York.

REFERENCES

1. Dyomin, A.M., 2009. Landslides in quarries: analysis and forecast. GEOS, Moscow. (in Russian)
2. Ivanov, I.P., 1987. Engineering geological research in mining. Nedra, Leningrad. (in Russian)
3. Nicolis, G., Prigogine, I., 1979. Self-organization in non-equilibrium systems. From dissipative structures to ordering through fluctuations. Mir, Moscow. (in Russian)
4. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., 2011. Patent for invention No. 2412305. A method for determining the depth of a deposit in a landslide-prone massif of potentially deforming horizon. 02.20.2011. Bulletin No. 5. (in Russian)
5. Pisarenko, G.S., Agarev, V.A., Kvitka, A.L., Popkov, V.G., Usmansky, E.S., 1973. Resistance of materials, in G.S. Pisarenko (ed.), 3rd edition. Vishcha school, Kiev. (in Russian)
6. Postoev, G.P., 2010. Equations of a massif state during the landslide formation. Engineering geology, No 4, pp. 48–53. (in Russian)
7. Postoev, G.P., 2013. Limit state and deformation of soils in the massif (landslides, karst dips, sediments of soil bases). Nestor-History, Moscow, St. Petersburg. (in Russian)
8. Prigogine, I., Stengers, I., 2003. Order out of chaos. Editorial URSS, Moscow. (in Russian)
9. Tikhvinsky, I.O., 1988. Evaluation and prediction of the stability of landslide slopes. Nauka, Moscow. (in Russian)
10. Prigogine, I., Nicolis, G., 1977. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. J. Wiley & Sons, New York.

CAPTIONS TO FIGURES

Fig. 1. The schematic cross-section of the landslide slope with the shapes of the blocks — dissipative structures in the soil massif: 1 — bedrock massif, 2 — landslide massif, 3 — border of the blocks (dissipative structures); Apl, Acr, Asl — plateau level, landslide terrace level, slip surface level

Fig. 2. The chaotic directions of the horizontal active stresses $\sigma_3 = \sigma_2$ on the horizontal area in a massif at the depth Z_p , where $\sigma_{li} = \gamma Z_i > \sigma_{stri}$

Fig. 3. Orientation of horizontal principal stresses σ_2 and σ_3 on force and equipotential lines on the horizon Z_i 1 — on the area, 2 — at the point (a single curve segment of the equipotential line); a — initial bedrock massif zone; P — force disturbance zone. 1 — force lines, 2 — equipotential line; σ_{1a} — vertical maximum, σ_{2a} and σ_{3a} — horizontal average and minimal principal back stress

Fig. 4. Schematic engineering-geological cross-section of the recent landslide block on the landslide section of Khoroshevo (Moscow): 1 and 2 — clays of the Volgian and Oxfordian stages of the Jurassic system, 3 — Quaternary sand deposits; 4 — slip surface; 5 — landslide body; 6 — borehole. Green lines — the borders of the blocks

Fig. 5. The Scheme to assess the state of soil horizon of the massif at the depth Z_a : 1 — the investigated massif-1 (active zone); 2 — landslide massif-2 adjacent to the massif-1 from the bottom (passive area)

Fig. 6. A scheme for calculation the stress-stain state in a massif with regard to dissipative structure formation. Green lines — borders of landslide blocks. Green arrows — pressure p_i from inside the block on the shell

Fig. 7. The scheme for stress calculation in a shell of a block — the element of dissipative structure in a soil massif near a landslide

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОСТОВЕВ Г.П.

Главный научный сотрудник лаборатории грунтоведения и механики грунтов Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, д.т.н., г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POSTOEV G.P.

Chief scientist of the Laboratory of Soil and Soil Mechanics, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, DSc (Doctor of Science in Technics), Moscow, Russia