
ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.543

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ТОЧКЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

© 2025 г. Г. П. Постоев

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),
Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*

E-mail: postoev.german@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.08.2024 г.

После доработки 19.12.2024 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

В природных условиях формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) геологической среды происходит по закону Кулона—Мора (в главных напряжениях). В каждой ее точке под давлением от веса вышележащих грунтов создается давление (литосферное, по аналогии с атмосферным). Обеспечение стабилизации состояния грунта в точке геологической среды происходит в результате самоорганизации НДС в соответствии с законом Кулона—Мора, увязывающего давления и прочность грунта в данной точке. Проведены сопоставление и анализ НДС грунтов в образцах при лабораторных испытаниях на компрессионное сжатие (с определением действующих давлений, характеристик прочности грунта) и в природных условиях в точке массива. Рассмотрены условия создания предельного состояния и проявления разрушающих деформаций грунта в точке.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, закон Кулона—Мора, самоорганизация, давление в точке, коэффициент бокового давления, структурная прочность, критерий предельного состояния, диссипативная геологическая структура*

DOI: 10.31857/S0869780925010074 EDN: DODFTY

ВВЕДЕНИЕ

К числу важнейших вопросов механики грунтов, инженерной геологии, грунтоведения и геоэкологии относятся формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) в литосфере (массиве грунта), определение прочности грунтов, выявление условий возникновения предельного состояния и прогноз развития разрушительных деформаций грунтов. Для их разрешения при проведении инженерных изысканий выявляются особенности инженерно-геологических условий исследуемой территории, включая геологическое строение, рельеф и гидрогеологические условия, физико-механические свойства грунтов, исходное НДС массива и опасные геологические процессы.

Исходное НДС в грунтах литосферы формируется под действием сил земного тяготения. Каждая точка массива воспринимает давление от веса вышележащих грунтов, но, кроме того, точки взаимодействуют между собой, вызывая локальное

повышение или понижение давления в грунте. В исходном состоянии грунтовый массив в поле напряжений Земли находится в условиях компрессионного сжатия. Согласно канонам механики грунтов, как и в испытаниях грунта на компрессионных приборах, должно соблюдаться условие невозможности боковых деформаций грунта, находящегося под действием вертикального давления. В соответствии с этим НДС грунта в точке принято увязывать со степенью его исходного уплотнения [4]. Но при этом не учитывается прочность структурных связей грунта. Действительно плотность грунта является одной из важнейших характеристик его состояния. Однако в законе Кулона—Мора (в главных напряжениях), характеризующем состояние в точке, параметры, определяющие степень плотности грунта, с выделением, например, нормально уплотненных или переуплотненных грунтов, отсутствуют, что может сказываться на достоверности результатов оценки НДС грунтовых массивов.

Ниже приводится анализ формирования по законам физики НДС грунта в точке и в массиве в целом, условий образования предельного состояния по схеме компрессионного сжатия в образце и массиве, подготовки разрушительных деформаций.

ЗАКОН КУЛОНА—МОРА — ЗАКОН ФИЗИКИ

Формирование НДС в природных оболочках Земли (литосфере, атмосфере и гидросфере) в поле тяготения Земли происходит в соответствии с законами физики. В атмосфере и гидросфере в каждой точке среды формируется и действует, в соответствии с законом Паскаля, давление в точке, равное давлению от веса вышележащего столба воздуха или соответственно воды.

В литосфере (геологической среде) горная порода (грунт) обладает прочностью структурных связей и трением. Соответственно формирование стабилизированного давления в точке происходит по закону Кулона—Мора, в котором учитываются особенности грунта [11]:

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

где p_i — проявившееся стабилизированное давление в точке массива, одинаковое во всех направлениях; γ — среднее значение удельного веса грунтов, залегающих над рассматриваемой точкой; Z_i — глубина залегания точки; $\sigma_{str,i}$ и φ_i — прочность структурных связей и угол внутреннего трения грунта в точке на глубине Z_i .

Часть давления от веса грунтов над i -й точкой компенсируется прочностью структурных связей

и трением в грунте, а оставшаяся доля проявляется по (1) в виде давления p_i .

По аналогии с атмосферным, природное давление p_i в точке геологической среды можно назвать **литосферным давлением**.

Формирование стабилизированного давления p_i в точках происходит как **самоорганизация исходного состояния (самоорганизация при эволюционном изменении НДС)** до достижения стабилизации состояния грунта. Любое изменение того или иного параметра в (1) вызывает соответствующие изменения других составляющих уравнения.

Давление p_i может рассматриваться как **интегральный параметр состояния и прочности грунта в точке**, которому соответствуют, согласно закону Кулона—Мора, стабилизированные значения: структурной прочности, сцепления и угла внутреннего трения.

Закон Кулона—Мора в лабораторных испытаниях

Значение давления грунта p_i в точке может быть определено при лабораторных испытаниях образца грунта на компрессионное сжатие (рис. 1), если прочность грунта в образце будет соответствовать прочности грунта в i -й точке массива.

Когда осевое давление σ_1 на верхний штамп прибора достигает значения вертикального давления γZ_i от веса вышележащих грунтов над i -й точкой в массиве, измеряемое давление грунта на стенку корпуса прибора (см. рис. 1) составит:

$$p_i = \sigma_3 = (\sigma_{1i} - \sigma_{sr}) \operatorname{tg}^2 (45 - \varphi_i/2). \quad (2)$$

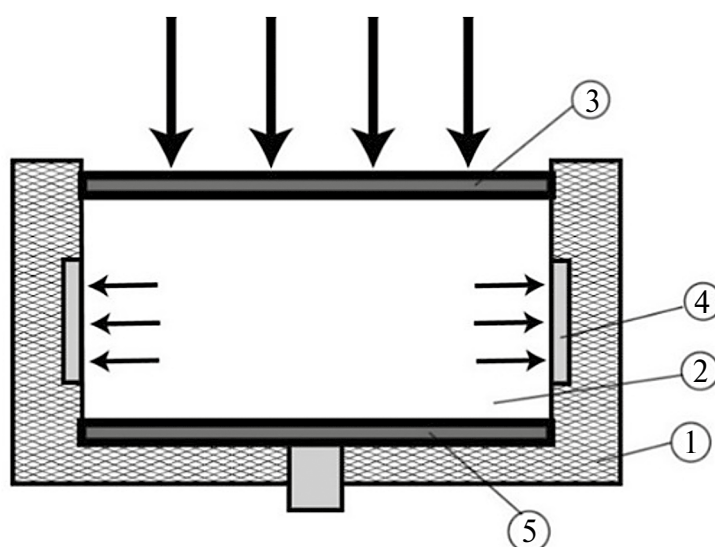


Рис. 1. Принципиальная схема осевого сжатия грунта в условиях невозможности бокового расширения с измерением реактивного бокового давления: 1 — жесткая стенка камеры устройства; 2 — образец грунта; 3 — верхний штамп; 4 — устройство для измерения реактивного бокового давления; 5 — нижний штамп.

Таким образом, компрессионные испытания позволяют получить значения давлений (наибольшего σ_1 и наименьшего σ_3), действующих на грунт в образце, для выражения закона Кулона—Мора в известных формулах в главных напряжениях:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi$$

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

В результате компрессионных испытаний связного грунта также могут быть получены значения коэффициента бокового давления и структурной прочности грунта (рис. 2).

Тангенс угла наклона линейной части графика зависимости $\sigma_3 = f(\sigma_1)$ равен $\operatorname{tg}^2(45 - \varphi_i/2)$, а по продолжению ее до оси абсцисс определяется структурная прочность σ_{str} . Таким образом, по полученным данным (σ_{1i} , σ_{3i} и σ_{str}) могут быть определены значения характеристик прочности грунта: $\sigma_{str,i}$, φ_i , c_i , в соответствии с формулами (3).

Боковое давление σ_3 профессор Е.И. Медков называл боковым распором [5], имея ввиду, что наибольшее давление σ_1 вызывает раздавливание грунта в образце. Возникающие напряжения после преодоления вертикальным давлением прочности структурного каркаса (т.е. прочности материала на одноосное сжатие) переориентируются на деформирование грунта (проявление аналогичного атмосферному давлению) в стороны от оси (см. рис. 1). В испытании на компрессионное сжатие боковое давление σ_3 измеряется как реакция (отпор) на проявление бокового распора грунта в образце.

Аналогично, в точке массива действует литосферное давление, и, в соответствии с законом

Кулона—Мора, грунт в соседних точках оказывает реактивный отпор по отношению к ней. То есть литосферное давление в точке передается на соседние точки, формируя равновесное состояние между давлениями распора и отпора.

СТРУКТУРНАЯ ПРОЧНОСТЬ И ЕЕ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ НДС В ТОЧКЕ

Прочность структурных связей (структурного каркаса) в связных грунтах имеет большое значение [7]. Если в формулах (3) принять, что $\sigma_3 = 0$, то получим:

$$\sigma_{1i} = \sigma_{str} = 2c \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi_i/2). \quad (4)$$

Следует отметить, что выражение (3) получено У.Дж. Ренкином еще в 1856 г. [3]. Е.И. Медков в методике испытаний на стабилометре М2 предлагал определять σ_{str} по графику (см. рис. 2) [5]. По данным испытаний для линейной части графика структурная прочность определяется по известным данным σ_{1i} , σ_{3i} и φ , из выражения:

$$\sigma_{str} = \sigma_{1i} - \sigma_{3i}/\operatorname{tg}^2(45 - \varphi_i/2). \quad (5)$$

Однако в испытаниях грунта на компрессионное сжатие с измерением бокового давления структурная прочность может быть получена и без построения графика зависимости $\sigma_3 = f(\sigma_1)$, учитывая, что при значениях осевого давления, превышающих структурную прочность, отношение приращений измеряемых давлений становится постоянной величиной [8]:

$$\Delta\sigma_3/\Delta\sigma_1 = m_i, \quad (6)$$

где m_i — коэффициенты бокового давления, $m_i = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi_i/2)$.

В соответствии с (2), структурная прочность грунта в значительной мере определяет величину литосферного давления p_i , которое проявляется в точке массива на глубине Z_i . То есть $\sigma_{str,i}$ — это доля давления σ_{1i} , которая “поглощается” сопротивлением структурных связей.

При формировании НДС в точке в условиях компрессионного сжатия мобилизация прочности грунта по мере восприятия вертикального давления происходит постепенно. Это видно из графика зависимости $\sigma_3 = f(\sigma_1)$. Процесс роста сопротивления структурных связей под давлением $\sigma_1 \approx \sigma_{str}$ на графике (см. рис. 2) представлен криволинейной линией, но точка перелома, определяющая предел прочности грунта в точке, — предельное давление на грунт, которое он может выдержать в отсутствие поддержки или окружающего грунта (в массиве) или стенок одометра (при испытании образца в ла-

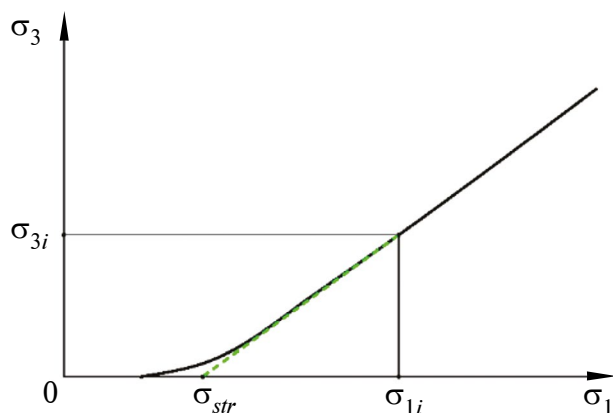


Рис. 2. График зависимости между боковым σ_3 и осевым σ_1 давлениями при компрессионном сжатии связного грунта.

боратории) — находится на пересечении линейной части графика и оси абсцисс (σ_{str}). При этом указанное предельное давление учитывает как сцепление (c), так и трение (ϕ). Практически σ_{str} может рассматриваться как предельное давление на одноосное сжатие [7].

Несомненно, что проявление структурной прочности выявляется и по перелому на компрессионной кривой, в соответствии с ГОСТ 12248-96 [1]. Однако, как и при применении закона Кулона—Мора, предпочтительнее определять структурную прочность по изменению напряженного состояния в точке (образце), т.е. по величинам давлений.

Следует иметь в виду, что предельное вертикальное давление на грунт, при котором полностью держится нагрузка (без проявления бокового давления) за счет прочности минерального каркаса (т.е. структурной прочности σ_{str}), учитывает и сцепление, и трение, согласно (4).

ЗАКОН КУЛОНА—МОРА И ПРЕДЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ (ОГИБАЮЩАЯ КРУГОВ МОРА)

В естественных (природных) условиях, как отмечено выше, вертикальное давление γZ_i от веса столба грунта над точкой создает по закону Кулона—Мора литосферное давление p_i в точке. Это НДС в точке может быть отражено соответствующим кругом Мора на графике сдвига (рис. 3), с точками p_i и γZ_i на оси абсцисс. При этом первый круг Мора, проходящий через начало координат, определяет на оси абсцисс точку σ_{str} — предельное давление на грунт (соответствует структурной прочности данного грунта), при котором вся нагрузка воспринимается структурным каркасом, т.е. не возникает боковое давление ($\sigma_3 = p_i = 0$).

Второй круг Мора опирается на точки p_i и γZ_i . На диаграмме сдвига два круга Мора характеризуют НДС в точке на глубине Z_i , когда наибольшее вертикальное давление (от веса столба грунтов над точкой) равно $\sigma_1 = \gamma Z_i$, а в точке формируется литосферное давление (естественное стабилизированное давление p_i в грунте) в соответствии с характеристиками прочности грунта, согласно (4) — (6): $\sigma_{str,i}$, ϕ , c .

Точки на глубине Z_i взаимодействуют между собой. И соседние точки, вертикальное давление на грунт в которых может быть ниже, чем в i -й точке, могут вызвать снижение давления p_i и в рассматриваемой точке [10]. При постепенном (эволюционном) изменении НДС в точке каких-либо разрушительных деформаций грунта не происходит. Поскольку грунт в точке сохраняет исходную прочность, то снижение литосферного давления, согласно закону Кулона—Мора, обуславливает уменьшение вертикального давления в точке на глубине Z_i , и формируется новое НДС с измененными (пониженными) значениями действующих давлений (вертикального и литосферного). Изменение состояния в точке происходит в процессе самоорганизации формирования НДС массива в поле земного тяготения что происходит, например, в массиве вблизи склона [10].

Таким образом, литосферное давление определяет нижний предел ($\sigma_{min} = p_i$, см. рис. 3) сохранения стабилизированного состояния в точке при вертикальном давлении $\sigma_1 = \gamma Z_i$. Огибающая кругов Мора фиксирует структурную прочность по кругу Мора, проходящему через начало координат, и стабилизированные значения угла внутреннего трения и сцепления данного грунта на глубине Z_i .

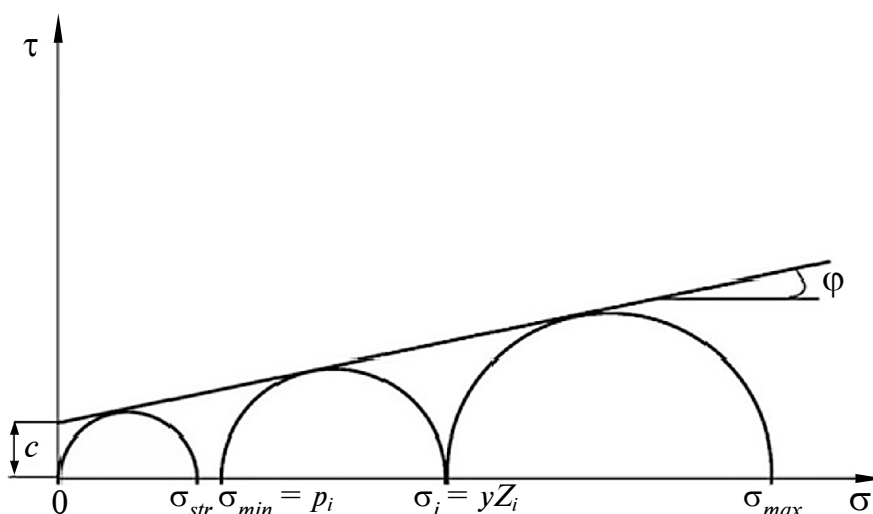


Рис. 3. Графическое представление на диаграмме сдвига характеристик прочности грунта в точке и предельных давлений для стабилизированного состояния по закону Кулона—Мора.

Вместе с тем анализ формирования НДС грунта в точке по закону Кулона—Мора показывает, что внешнее (для точки) горизонтальное воздействие на грунт может создавать значительно большее напряжение в грунте, чем p_i (пассивное состояние). При этом возможное предельное давление в грунте, в условиях сохранения исходных величин давления γZ_i и характеристик $\sigma_{str,i}$, ϕ_i , c_i , принимает значение σ_{max} . Горизонтальное давление, воздействующее на точку, меньшее значения σ_{max} , но большее γZ_i , мобилизует в точке только часть прочности грунта (снижается мобилизация трения: уменьшается угол ϕ_i) с обеспечением устойчивого состояния.

Итак, в грунте, в точке массива в поле земного тяготения под давлением γZ_i от веса столба грунтов над точкой создается литосферное давление $\sigma_{min} = p_i$ — нижний предел для данных условий стабилизированного состояния грунта. Верхним пределом давления в точке является внешнее горизонтальное давление σ_{max} на грунт, когда наименьшее напряжение по Кулону—Мору — это вертикальное давление “столба” $\gamma Z_i = \text{const}$.

Принимая значение вертикального давления γZ_i в качестве наибольшего или наименьшего в оценке НДС по закону Кулона—Мора, можно определить предельные значения давления в грунте для стабилизированного его состояния. Следует отметить, что в процессе **самоорганизации формирования НДС массива** (в период перехода от исходного НДС к новому состоянию грунта), изменения значений давления в грунте могут приводить к изменениям величин ϕ_i и c_i , причем в большей мере происходит изменение угла внутреннего трения. В условиях **компрессионного сжатия в массиве** структурная прочность грунта в точке остается постоянной до возникновения разрушительных деформаций структурных связей.

Вместе с тем в лабораторных исследованиях результаты испытаний грунта, представленные в соответствии с рис. 3, трактуются как условия предельного равновесия [2, 13]. И действительно так. В условиях компрессионного сжатия образца грунта в приборе каждый круг Мора с главными напряжениями σ_3 и σ_1 , касающийся огибающей, определяет предельное состояние грунта в компрессионном приборе (при данных давлениях). Малейшее снижение величины σ_3 при $\sigma_1 = \text{const}$, приводит к немедленному развитию разрушительных деформаций грунта.

В естественных условиях любое изменение одного из давлений на грунт в точке массива (при неизменной прочности грунта), в соответствии с законом Кулона—Мора, приводит к изменению и второго давления для достижения стабилизированного состояния грунта в процессе самоорганизации его НДС.

Следовательно лабораторные испытания грунта на компрессионное сжатие позволяют определить стабилизированные значения характеристик прочности грунта (при $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$), моделируя текущее стабилизированное (но не предельное) состояние грунта в точке массива на глубине Z_i .

Пример расчета НДС грунтового массива

Используем данные о свойствах грунтов, представленные в СП 50-101-2004, таблицы Г1 и Г2¹. Принимаем, что грунты на исследуемой территории залегают на глубине 10 м, требуется оценить НДС и определить давление в точках массива на этой глубине. Принимаем также, что среднее значение удельного веса грунтовой толщи до глубины 10 м составляет $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$. Тогда давление от веса грунтов на точки на рассматриваемом горизонте составит $\gamma Z_i = 200 \text{ кПа}$.

Расчеты выполнены с использованием формул (1), (2), (5) и (6). Исходные данные и результаты расчетов приведены в табл. 1. Для песков среднее значение литосферного давления составило $p_{cp} = 43.7 \text{ кПа}$.

Наибольший вклад в результаты вычислений давления вносит значение угла внутреннего трения (ϕ). Чем выше величина ϕ грунта, тем ниже давление в точке: для гравелистого и крупного песка $p_{min} < 43.7 \text{ кПа}$. Для мелкого и пылеватого песков снижается в результатах расчетов вклад трения (угол ϕ), но повышается сцепление и соответственно структурная прочность грунта. Все же для песков главным фактором, обуславливающим величину давления в точке на глубине Z_i , т.е. при вертикальном давлении γZ_i , является трение между частицами.

В глинистых грунтах определяющую роль в формировании давления в точке играет структурная прочность. Чем больше структурная прочность грунта, тем меньше значение давления в точке. То есть при формировании НДС большую часть давления γZ_i берет на себя структурный каркас грунта (см. глины, в нижних строчках табл. 1), соответственно в точке давление уменьшается по сравнению с другими грунтами.

Что происходит в песчаных грунтах? Чем больше пористость (т.е. грунт менее плотный), тем больше давление p в точке. Но здесь проявляется зависимость между плотностью грунта и углом внутреннего трения. С увеличением пористости (коэффициента пористости) уменьшается значение угла ϕ . Соответственно возрастает коэффициент бокового давления m . Получается, что и в песках, как это следует из закона Кулона—Мора, основное значение для формирования НДС в точке также имеет прочность грунта, в частности, характери-

1 <https://docs.cntd.ru/document/1200038307>

Таблица 1. Результаты расчета составляющих НДС в точках для четвертичных отложений по таблицам Г.1 и Г.2 из СП 50-101-2004 на глубине $Z_i = 10$ м

Наименование грунта	Значения характеристик грунта				Расчетные значения составляющих НДС			
	e	I_L	φ , град.	c , кПа	$\sqrt{m}$	m , по (6)	σ_{str} , кПа	p , кПа
Гравелистый и крупный песок	0.45	—	43	2	0.4350	0.189	4.6	36.9
	0.55	—	40	1	0.466	0.217	2.15	42.9
Песок средней крупности	0.45	—	40	3	0.466	0.217	12.9	40.6
	0.55	—	38	2	0.488	0.238	7.85	45.7
Мелкий песок	0.45	—	38	6	0.4880	0.238	24.6	41.7
	0.55	—	36	4	0.510	0.260	15.7	47.9
Пылеватый песок	0.45	—	36	8	0.5100	0.260	31.4	43.8
	0.55	—	34	6	0.532	0.283	22.6	50.2
Супесь	0.65	0.25–0.75	24	13	0.649	0.422	40	67.6
Суглинок	0.65	0.5–0.75	19	25	0.713	0.509	70.1	66.1
Глина	0.65	0.25–0.50	18	57	0.727	0.528	156.9	22.8
	0.75	0.25–0.50	17	50	0.74	0.548	135.1	35.6

Примечание. e — коэффициент пористости; I_L — показатель текучести; $\sqrt{m} = \text{tg}(45 - \varphi/2)$.

стики трения и структурной прочности (если она проявляется).

Таким образом, знание характеристик прочности грунтов для исследуемого массива позволяет произвести анализ изменения НДС на рассматриваемом его горизонте с определением значений коэффициента бокового давления (m_i) по (6) и литосферного давления (p_i) по (2) в соответствующих точках.

О ФОРМИРОВАНИИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В ТОЧКЕ МАССИВА

Выше было установлено, что *стабилизированное* НДС в точке массива не свидетельствует о *предельном* состоянии. В точке создается равновесное состояние в комплексе с окружающим грунтом, т.е. равновесие между давлениями распора (в точке) и отпора — реакции соседней точки. Напряжения $\sigma_{\min} = p_i$ и $\sigma_{\max}$ в точке массива, в соответствии с графиком на рис. 3, определяют пределы стабилизированного состояния грунта в точке при $\gamma Z_i = \text{const}$. Но могут возникнуть условия, когда достигается предельное снижение литосферного давления в точке, например, на границе с активным оползневой очагом. Создаются условия развития процессов аномальной “утечки” напряжений в сторону склона.

Например, на участке подготовки оползневого блока формируется базис — нижняя граница

развития оползневых смещений (базис смещения оползневого тела в очаге), и выявляется точка на горизонте базиса (на центральном створе аномального участка), где действует наибольшее значение вертикального давления γZ_a (в исходном состоянии) и концентрируется максимальное влияние аномалии по изменению литосферного давления. Над данной точкой (рис. 4, над горизонтом базиса оползневой угрозы на глубине Z_a) в предельном состоянии, в соответствии с механизмом самоорганизации, создается новая крупная диссипативная геологическая структура (ДГС), и происходит перестройка НДС. Образовавшаяся ДГС имеет форму полушара радиусом Z_a , касающегося базиса в нижней точке.

В данном случае параметр Z_a определяет масштаб угрозы воздействия оползневого процесса, нижнюю границу вовлечения коренного массива в аномальное изменение НДС. В исходном состоянии массива (за пределами оползня) на глубине Z_a по (2) действовало давление p_a . Предельное состояние создается, когда высота столба над точкой на базисе ДГС-блока (см. рис. 4, по вертикали от O_1) уменьшается на величину H_{cr} . При этом, согласно анализу фактических случаев образования оползневых блоков, получено [7]:

$$H_{cr} \approx Z_a/2. \quad (7)$$

В соответствии с (7) уравнение предельного состояния ДГС-блока, приведенное в работах [6, 9, 12], принимает вид:

$$\gamma Z_a - \sigma_{str,a} = \pi \gamma Z_a / 4. \quad (8)$$

По выражению (8) устанавливается критерий предельного состояния в точке массива при оценке оползневой опасности, который определяет предельное соотношение между прочностью грунта в точке массива и вертикальным давлением от грунтовых масс, лежащих выше:

$$\sigma_{str,a} / \gamma Z_a = 1 - \pi/4 = 0.215. \quad (9)$$

При образовании нового оползневой блока на участке Хорошево глубина до базиса оползания составляла $Z_a = 31.5$ м (по инструментальным измерениям), а $H_{cr} \approx 0.5Z_a = 16$ м [9]. Подставляя фактические данные в выражение (9), с учетом $\gamma = 20$ кН/м³, $\sigma_{str,a} = 140$ кПа, получим, что $\sigma_{str,a} / \gamma Z_a = 0.222$. Это близко к значению критерия предельного состояния 0.215.

Критерий 0.215 по (9) определяет условия (на локальном участке, где действуют процессы, вызывающие снижение давления в точках массива), при которых возможно формирование предельного состояния в точке на глубине Z_i и образование ДГС (в данном случае радиусом $Z_a = Z_i$), в соответствии со структурной прочностью $\sigma_{str,a}$ грунта в точке.

В числителе выражения (9) представлена структурная прочность грунта, а в знаменателе — произведение среднего значения удельного веса γ грунтов над точкой и параметра ДГС, в которой радиус граничной оболочки $Z_a = Z_i$.

Таким образом, возникновение опасной ситуации — предельное изменение НДС в точке массива, может быть установлено по критерию 0.215, учитывающему структурную прочность грунта и параметр новой структуры (ДГС) над точкой (при подготовке оползневой блока — глубина Z_a до базиса ДГС-блока).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование напряженно-деформированного состояния геологической среды происходит по законам природы. Геологическая среда в поле тяготения Земли находится в условиях компрессионного сжатия. НДС в каждой ее точке формируется по закону Кулона—Мора. В отличие от лабораторных испытаний, геологическая среда в природе постоянно находится под нагрузкой, которую создает грунтовая масса над точкой.

В каждой точке грунтового массива, в результате действия процессов самоорганизации геологической среды, создается и поддерживается равновесное, стабилизированное состояние. Закон Кулона—Мора увязывает давления и прочность грунта в точке в устойчивую саморегулирующуюся систему. Знание характеристик прочности грунта в точке позволяет с использованием закона Кулона—Мора (1) получить информацию о действующих давлениях в точке.

С другой стороны, по выявленным напряжениям в точке можно установить данные о прочности грунта, которые определяют его сопротивляемость нагрузкам за счет устойчивости структурного каркаса и трения между частицами и агрегатами. В естественных условиях установившееся НДС в точке по (1) определяет не предельное равновесие,

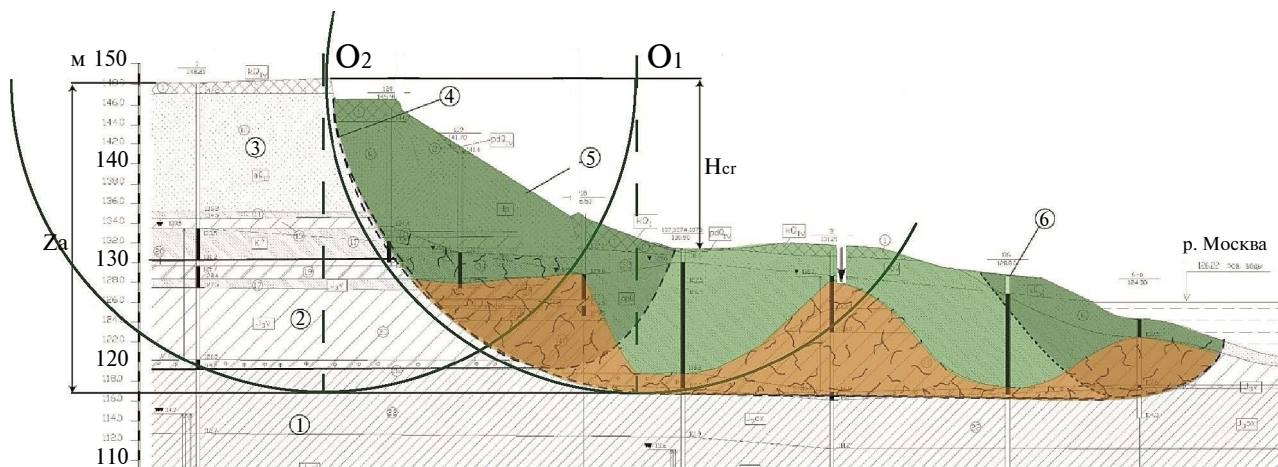


Рис. 4. Схематический инженерно-геологический разрез по центральному створу зоны образования нового оползневой блока в 2007 г. на оползневом участке Хорошево (Москва) [9]. 1 и 2 — глины волжского и оксфордского ярусов юрской системы соответственно; 3 — пески четвертичных отложений; 4 — поверхность скольжения; 5 — тело оползня; 6 — скважина. Окружности с центрами O_1 и O_2 — границы ДГС (показаны зелеными линиями).

а стабилизированное состояние грунта **при данных значениях прочности и действующих давлений**.

Структурная прочность грунта — одна из важнейших характеристик состояния и механических свойств грунта. Знание структурной прочности необходимо как для выявления текущего НДС грунта в точке массива, так и для оценки условий его стабилизированного и предельного состояний.

Аномальное изменение НДС может возникнуть на локальном участке массива, где на него проявляется внешнее воздействие (например, оползневой процесс), вызывающее снижение давления в точках.

Установлен критерий 0.215, определяющий условия формирования предельного состояния в точке массива по соотношению между прочностью грунта в точке и вертикальным давлением от грунтовых масс, лежащих выше (при оползневой угрозе). Предельное состояние в точке массива реализуется с образованием новой крупной структуры (ДГС) над точкой, функционирование которой определяет дальнейшее развитие деформаций грунтов на локальном участке массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы определения деформационных прочностных свойств грунтов. М., 1996.
- Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Л.: Стройиздат, 1988. 415 с.
- Емельянов Л.М. Расчет подпорных сооружений: Справ. пос. М.: Стройиздат, 1987. 288 с.
- Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. М.: Недра, 1980. 272 с.
- Медков Е.И. Фазы сопротивления грунта // Механика грунтов, основания и фундаменты. М.: Трансжелдориздат. Труды МИИТ. 1959. Вып. 100. С. 26–61.
- Постоев Г.П. Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней. // Инженерная геология. 2018. Т. XIII. №3. С. 54–61.
- Постоев Г.П. Закономерности гравитационного деформирования грунтовых массивов // Геоэкология. 2009. №6. С. 534–543.
- Постоев Г.П., Казеев А.И., Кутергин В.Н. Определение консолидированных характеристик прочности грунта по испытанию на компрессионное сжатие // Геоэкология. 2018. №3. С. 36–42.
- Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Геологические закономерности образования диссипативных геологических структур — оползневых блоков // Геоэкология. 2021. №4. С. 33–40.
- Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Закон Кулона—Мора и изменение напряженно-деформированного состояния оползнеопасного массива // Геоэкология. 2022. №4. С. 16–25.
- Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. 2020. №6. С. 22–31.
- Постоев Г.П., Кучуков М.М., Казеев А.И., Орлова Н.А. Геологический критерий 0.009 в развитии геодинамических процессов. // Сергеевские чтения. 2023. Вып. 24. С. 23–28.
- Цытович Н.А. Механика грунтов. Изд. 4. М.: Госстройиздат, 1963. 636 с.

ANALYSIS OF CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE AT A POINT IN GEOENVIRONMENT

G. P. Postoev

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

E-mail: postoev.german@yandex.ru

Under natural conditions, the stress-strain state of the geological environment is formed according to the Coulomb—Mohr law (for principal stresses). The lithospheric pressure (by analogy with atmospheric one) is created at each point of geological massif under the weight of overlying deposits. Stabilization of the ground state at each point of the geoenvironment is ensured by self-organization of the stress-strain state in accordance with the Mohr—Coulomb law, which links the pressure and ground strength at a given point. The stress-strain state of soils in samples was analyzed using laboratory compression tests (with determination of acting pressure and soil strength characteristics) and compared to that in natural conditions at a point of the massif. The conditions for reaching a limit state and the manifestation of destructive soil deformations at a point are considered.

Keywords: *stress-strain state, Mohr—Coulomb law, self-organization, pressure at a point, lateral pressure coefficient, structural strength, limit state criterion, dissipative geological structure*

REFERENCES

1. [GOST 12248-96. Soils and rocks. Methods of determination of deformational and strength properties of soils and rocks.] Moscow, 1996 (in Russian).
2. Dalmatov, B.I. [Soil mechanics and foundation engineering]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1988, 415 p. (in Russian)
3. Emel'yanov, L.M. [Calculation of retaining structures]. Guidebook. Moscow, Stroyizdat, 1987, 288 p. (in Russian)
4. Lysenko, M.P. [Composition and physico-mechanical properties of soils and rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1980, 272 p. (in Russian)
5. Medkov, E.I. [Phases of soil resistance]. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty*, Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1959, issue 100, pp. 26–61. (in Russian)
6. Postoev, G.P. [Dissipative structures in the soil massif by the example of the formation of deep landslides]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, vol. XIII, no. 3, pp. 54–61, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-3-54-61>. (in Russian)
7. Postoev, G.P. [Regularities in gravitational deformation of ground massifs]. *Geokologiya*, 2009, no. 6, pp. 534–543. (in Russian)
8. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kutergin, V.N. [Soil strength parameters determined by compression test]. *Geokologiya*, 2018, no. 3, pp. 36–42. (in Russian)
9. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. [Geological regularities of formation of dissipative geological structures — landslide blocks]. *Geokologiya*, 2021, no. 4, pp. 33–40. (in Russian)
10. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. [Coulomb–Mohr's law and transformation of the stress-strain state of the landslide-prone slope]. *Geokologiya*, 2022, no.4, pp.16–25. (in Russian)
11. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. [Physical laws of stress distribution in geoenvironment]. *Geokologiya*, 2020, no. 6, pp. 22–31. (in Russian)
12. Postoev, G.P., Kuchukov, M.M., Kazeev, A.I., Orlova, N.A. [The geological criterion 0.009 in the development of geodynamic processes]. *Sergeev's readings*, 2023, issue 24, pp. 23–28. (in Russian)
13. Tsytovich, N.A. [Soil and rock mechanics. Ed. 4]., Moscow, Gosstroyizdat, 1963, 636 p. (in Russian)