

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-29-35

УДК 624.131.7

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ОСАДОК ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

THE GEOLOGICAL BASIS FOR CALCULATING OF THE GROUND BASE SETTLEMENT

© 2023 г. Г. П. Постоев¹, А. И. Казеев², М. М. Кучуков³© 2023 German P. Postoev¹, Andrey I. Kazeev², Marat M. Kuchukov³^{1,2,3}Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),

Уланский переулок, д. 13, стр. 2 (а/я 145), Москва, 101000, Россия

^{1,2,3}Sergeev Institute of Environmental Geoscience of Russian Academy of Sciences (IEG RAS), Ulansky lane,
13, bld 2 (POB 145), Moscow, 101000, Russiaopolzen@geoenv.ru¹, kazeev@yandex.ru²

Аннотация. В статье рассматриваются геологические закономерности преобразования напряжённо-деформированного состояния (НДС) грунтового основания путем образования диссипативных геологических структур, осуществляющих взаимодействие геологической среды и фундамента. Представлена технология (метод) расчета осадки грунтового основания. На конкретном примере оценки осадки ленточного фундамента показано, что предлагаемая технология работоспособна и может быть в дальнейшем использована для практических целей.

Abstract. The article discusses the geological regularities of the transformation of the stress-strain state of the soil foundation through the formation of dissipative geological structures that interact between the geological environment and the foundation. The technology of calculation of the ground base settlement is presented. A specific example of estimation of strip foundation settlement shows that the proposed technology is efficient and can be further used for practical purposes.

Ключевые слова: геологическая среда; геологические закономерности; диссипативные геологические структуры; ленточный фундамент; уравнение предельного давления; критическое значение осадки; осадка в текущий момент времени; тестовый пример

Key words: geological environment; geological regularities; dissipative geological structures; strip foundation; equation of limit pressure; critical value of settlement; current settlement; test case

Введение

Поводом для написания данной статьи послужила публикация в журнале «Грунтоведение» работы [3], в которой дана критика существующих представлений об осадке грунтового основания как уплотнения под нагрузкой от фундамента и методов расчета путем послойного суммирования. Авторы работы [3] предлагают рассматривать осадку грунтов основания как многофакторный интегральный инженерно-геологический процесс, как реакцию грунтового массива на воздействие нагрузки от фундамента, полагая, что происходит не просто уплотнение грунтового основания, а его вертикальное оседание вследствие снижения прочности грунтов и их деформирования под влиянием природных и техногенных факторов.

Действительно, необходимость выявления геологических закономерностей, обуславливающих формирование осадки фундамента, является важным вызовом для проведения соответствующих фундаментальных исследований. В ИГЭ РАН в последние годы проводятся исследования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива как защитной его реакции при локальном внешнем силовом возмущении в виде оползневого очага, подземной полости, техногенного воздействия. Выявлены закономерности образования в массиве диссипативных геологических структур (ДГС), которые регламентируют изменение НДС и процесс подготовки разрушительных деформаций, в том числе в основании фундамента [9].

Исходное напряжённо-деформированное состояние в массиве

Грунтовое основание рассматривается не как линейно деформируемое полупространство, а как часть геологической среды, на которую действует внешнее силовое возмущение в виде нагрузки от фундамента. Геологическая среда находится в условиях компрессионного сжатия. Согласно законам физики, в воздушной и водной среде давление в точке вызывается соответственно весом столба газа или жидкости над ней (закон Паскаля с учетом земного тяготения). В геологической среде также в соответствии с законами физики давление в точке определяется весом столба грунта, но с учетом сил сопротивления, вызываемых прочностью структурных связей и трением между частицами грунта.

Напряженно-деформированное состояние грунта в точке в условиях компрессионного сжатия характеризуется законом прочности Кулона-Мора [7, 9]:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = tg^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (1)$$

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 выражается как:

$$\sigma_{str} = 2c \cdot tg \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

где c — сцепление грунта.

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

$$p_i = \sigma_{3,i} = (\sigma_{1,i} - \sigma_{str,i}) \cdot tg^2 \left(45 - \frac{\varphi_i}{2} \right) \quad (3)$$

В геологической среде давление p_i , определяемое по выражению (3) для i -той точки, передается во все стороны, как и давление по закону Паскаля в газовой и водной средах. Таким образом, формируется статичное напряжённо-деформированное состояние (НДС) в грунтовом массиве с действием давления по (3), с учетом исходных геологических условий и совокупности других факторов, проявляющихся в каждой i -той точке массива.

Диссипативные геологические структуры (ДГС) в грунтовом основании

Установлено, что локальное внешнее силовое воздействие (оползневой очаг, подземная полость и др.) на геологическую среду вызывает возникновение процесса диссипации с образованием новых геологических структур [8, 9]. Геологическая среда создает ДГС как замкнутые крупные объемы грунта, которые предназначены для защиты от внешнего воздействия, локализации изменения НДС в границах ДГС и обеспечения сохранности исходного НДС за их пределами. В грунтовом основании при достижении предельных нагрузок под ленточным фундаментом образуются две симметрично расположенные геологические структуры ДГС₂ (рис. 1), похожие на зоны предельного равновесия, выделяемые в механике грунтов по теоретическим решениям и экспериментальным исследованиям [1, 2, 4, 5, 12]. В локальной части геологической среды, в зоне силового возмущения, происходит переход от исходного распределения напряжений в точках к распределению напряжений в основании образуемых ДГС, воспринимающих внешнее воздействие. Геологическая среда, в том числе грунтовое основание, находится в условиях компрессионного сжатия с формированием НДС по закону Кулона-Мора в главных напряжениях по (1), но в предельном состоянии рассматривается взаимодействие ДГС как отдельных крупных точек массива между собой и с объектом внешнего воздействия. Для ленточного фундамента основным параметром, определяющим размеры ДГС, является его ширина b [10]. Посредством ДГС геологическая среда предусматривает защиту исходного НДС в виде создания по границам оболочек, в грунтах которых происходит трансформация НДС, в соответствии с геологическим критерием 0,009 [10, 11],

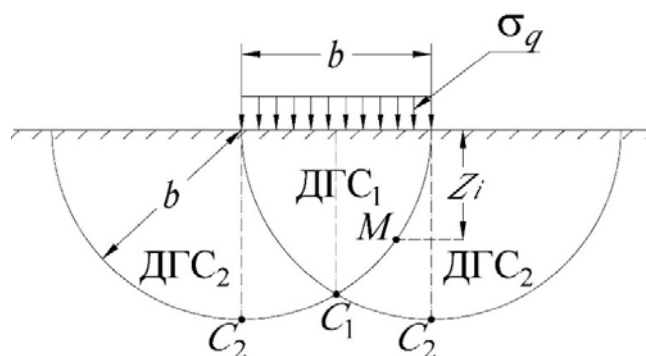


Рис. 1. Схема расположения диссипативных геологических структур в грунтовом основании под нагрузкой от ленточного фундамента шириной b . σ_q — давление на грунтовое основание под подошвой фундамента; ДГС₁ и ДГС₂ — диссипативные геологические структуры в грунтовом основании.

отделение и выпор структур при нагрузках, превышающих предельное значение.

При возникновении давления σ_q по подошве фундамента шириной b , в грунтовом основании полной перестройки НДС, с образованием указанных выше ДГС, не происходит до тех пор, пока нагрузка не достигнет предельного значения. Так, при изучении процессов образования и функционировании ДГС на участке подготовки оползневого блока установлено, что до возникновения предельного состояния коренного массива границы ДГС не проявляются. В коренном массиве у границы воздействия оползневого процесса (оползневого очага) сохраняется исходное НДС. Как и под ленточным фундаментом, в подготовке оползневого блока участвуют две ДГС. В средней части также образуется ядро, как ДГС₁. Воздействие оползневого процесса проявляется в разгрузке напряжений в коренном массиве до базиса — нижней границы развития смещений. Ширина ядра по верхней площадке ДГС совпадает по величине с глубиной Z_a до базиса ДГС (как и под ленточным фундаментом) [11]. С достижением предельного состояния по уравнению равновесия сил на горизонте базиса дальнейшее изменение НДС проявляется с **возникновением граничной оболочки ядра и началом деформаций грунтов в ней по схеме скашивания, оседанием ядра**. Часто признаком появления новой границы (оболочки ядра ДГС) в коренном массиве является возникновение подпора грунтовых вод. Остальные граничные оболочки ДГС проявляются уже после того, когда деформации грунтов в оболочке (чаще только по тыловой границе ядра — границе отделения ДГС-блока) достигнут критического значения $0,009 Z_a$. Далее по поверхности сдвига в грунтах оболочки ДГС, захватывающей и верхнюю часть склона, происходит разрушительное смещение ДГС-блока [11].

Анализ процессов перестройки НДС геологической среды при формировании оползневого блока и развития зон пластических деформаций под ленточным фундаментом позволяет говорить о том, что ядро ДГС₁ образуется с началом деформаций грунтового основания (возникновением пластических деформаций по краям фундамента).

На схеме (рис. 1) представлены ДГС для предельного состояния грунтового основания. В центральной части грунтового основания под фундаментом, в зоне пересечения указанных диссипативных геологических структур, образуется ядро (ДГС₁) в виде клина, в котором боковые образующие — дуги окружности радиусом, равным b . Соответственно нижняя точка ядра является вершиной равносто-

ронного треугольника со стороной b , а осевая часть имеет значение $b \cdot \cos 60^\circ = 0,866 b$.

Для ленточного фундамента уравнение предельного равновесия, в соответствии с рис. 1, имеет вид [10]:

$$\frac{\gamma b}{m} + \sigma_{str} = (0,866 \gamma b - \sigma_{str} + \sigma_{q,cr}) \cdot m,$$

и отсюда:

$$\sigma_{q,cr} = \gamma b \left(\frac{1}{m^2} - 0,866 \right) + \sigma_{str} \left(\frac{1}{m} + 1 \right), \quad (4)$$

где γ — среднее значение удельного веса грунтов основания толщи над горизонтом точек C_2 ; b — ширина фундамента; σ_{str} и φ — соответственно структурная прочность и угол внутреннего трения грунта на уровне точек C_1 и C_2 ; $m = \tan^2(45 - \varphi/2)$ — коэффициент бокового распора; $\sigma_{q,cr}$ — предельное значение давления на грунтовое основание под подошвой фундамента.

Закономерности и механизм развития деформаций и формирования осадки грунтового основания

Теоретические и экспериментальные исследования, данные мониторинга возникновения и развития ДГС при образовании оползневого блока, провала над подземной полостью и формирования зон выпора грунтового основания показали, что основной параметр ДГС (радиус кривизны её границ) определяет и толщину h оболочки ДГС, отделяющей её от остальной части геологической среды.

Для ленточного фундамента шириной b толщина грунтовой оболочки ДГС составит $h = 0,009 b$, для круглого фундамента диаметром b толщина оболочки меньше в два раза [10].

Фундамент создает давление на грунтовое основание и, соответственно, на ДГС₁-ядро, в котором давление p_i в точке включает и текущее значение $\sigma_{q,i}$ давления под фундаментом.

Внутри ДГС₂ давление в точках соответствует исходному НДС, т.е. значению p_i по выражению (3).

Результаты исследования процессов подготовки оползневого блока [7], формирования ядра под фундаментом [1, 4, 5] показали, что на допредельном этапе изменения НДС грунтового основания, связанные с ростом $\sigma_{q,i}$ могут происходить в основном в грунтах оболочки ядра-ДГС₁, где действующие напряжения повышаются за счёт действия давления фундамента. По-видимому, ядро как диссипативная геологическая структура ДГС₁ с граничной оболочкой, в которой возникает новое НДС, образуется при нагрузках, когда начинается фаза

сдвигов с проявлением пластических деформаций грунтов под краями фундамента [1, 12].

В соответствии с представлениями о функционировании ДГС, изложенными выше, увеличение давления $\sigma_{q,i}$ вызывает оседание ДГС₁ и деформации грунтов в узкой зоне оболочки ядра по механизму скашивания (рис. 2). То есть допредельная осадка фундамента — это деформация грунта в оболочке ДГС₁, смещение на величину Δl_i при оседании ДГС₁ вместе с фундаментом.

В соответствии с представленными геологическими основами расчёта осадки, НДС грунтового основания при предельном давлении $\sigma_{q,cr}$ фундамента характеризуется следующим [10]:

- давление p_{1i} в точках ядра ДГС₁ равно:
$$p_{1i} = (\gamma Z_i - \sigma_{str,i} + \sigma_{q,cr}) \cdot \operatorname{tg}^2(45 - \frac{\varphi_i}{2}), \tag{5}$$

где Z_i — глубина от подошвы фундамента до i -того горизонта в ядре; в точках ДГС₂ (вне ДГС₁) давление соответствует исходному состоянию, т.е. определяется по формуле (3);

- напряжения в оболочке геологических структур грунтового основания, определяющие его НДС, находятся в равновесии в соответствии с уравнением (4);
- угол поворота ДГС₂ составит $\alpha_{cr} = h/b = 0,00901944$ радиана или $\alpha_{cr} = 0^\circ 31'$, что составляет π^3 минут;
- угол скашивания грунтов в оболочке достигает 45° ;
- относительное значение деформации скашивания грунта в оболочке составляет:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{h}{b} = \frac{\Delta l_{cr}}{b} = 0,009, \tag{6}$$

где ε_{cr} и Δl_{cr} — относительное и абсолютное критическое значение деформации грунта в оболочке соответственно при достижении предельного давления фундамента на грунтовое основание.

С ростом давления $\sigma_{q,i}$ на грунтовое основание увеличивается значение давления p_i на величину $\sigma_{q,i}$ в точках ядра ДГС₁. В краевых точках подошвы фундамента деформации грунта в оболочке практически определяют осадку фундамента, в соответствии с изменением НДС в грунтах оболочки ядра (ДГС₁).

При достижении предельного состояния ($\sigma_{q,i} = \sigma_{q,cr}$; $S_i = \Delta l_{cr} = 0,009 b$) в механизме самоорганизации геологической среды предусмотрено, что по обе стороны ДГС₁ появляются границы ДГС₂. В пределах новых границ локализуются зоны снижения напряжений (вследствие нагрузки от фундамента).

Дальнейший рост нагрузки от фундамента приводит к переходу механизма деформирования грунта в оболочке от «скашивания» к «сдвигу» по образованной поверхности в грунтах внутри оболочки. В связных грунтах переход к механизму сдвига в оболочке ДГС приводит к разрыву структурных связей (значения сцепления и структурной прочности грунта в оболочке снижаются до нуля).

Таким образом, при $\sigma_{q,i} \geq \sigma_{q,cr}$ в оболочках ДГС₂ образуются поверхности скольжения (сдвига), происходит проседание ядра ДГС₁ и выпор вбок ДГС₂.

Следует отметить, что на допредельном этапе состояния грунтового основания, когда $\sigma_{q,i} < \sigma_{q,cr}$, абсолютные значения текущей осадки S фундамента при небольшой ширине фундамента могут быть весьма малы. Так при ширине ленточного фундамента $b = 2$ м критическое значение осадки

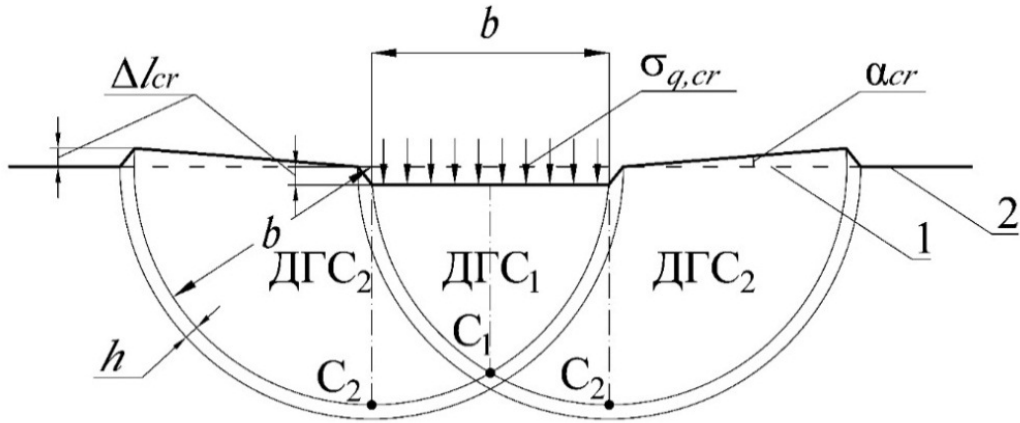


Рис. 2. Схема проявления ДГС и деформаций в оболочке ДГС при достижении предельного давления $\sigma_{q,cr}$ на грунтовое основание. Осадка $S_i = \Delta l_{cr}$ ленточного фундамента и смещение $\Delta l_i = h$ грунта в оболочке толщиной h по механизму скашивания при предельном давлении $\sigma_{q,cr}$ на грунтовое основание.

составит $S_{cr} = \Delta l_{cr} = h = 0,009 b = 0,018$ м, а текущие значения — ещё меньше, миллиметры.

Для определения предельной величины давления ленточного фундамента шириной b на грунтовое основание по уравнению (4) требуется информация по механическим свойствам грунтов на глубине $Z \approx b$, включая γ ; φ ; c и σ_{str} . Принимая линейную зависимость между давлением фундамента σ_q и относительной его осадкой на допредельном этапе состояния грунтового основания, можно определить текущее значение S_i осадки в соответствии с критерием (7) и графиком на рис. 3:

$$S_i = \Delta l_i = 0,009b \left(\frac{\sigma_{q,i}}{\sigma_{q,cr}} \right). \quad (7)$$

Итак, процедура определения осадки фундамента, в соответствии с изложенным выше, выглядит следующим образом:

- 1) по данным изысканий устанавливаются значения указанных выше механических свойств грунтов на глубине $Z_i \approx b$;
- 2) вычисляется предельное давление $\sigma_{q,cr}$ на грунтовое основание по уравнению (4);
- 3) устанавливается текущее значение $\sigma_{q,i}$ давления фундамента на грунтовое основание;
- 4) определяется величина осадки при текущем (проектном) значении давления фундамента $\sigma_{q,i}$ по выражению (7).

Тестовый пример расчета осадки по изложенной методике

В работах [6, 7] приведены результаты расчёта осадки по разным технологиям.

Объект — фундамент пятиэтажного дома в городе Новочеркасске.

Исходные данные [6]:

- место строительства: г. Новочеркасске;
- размеры площадки: 30,2 x 13,01 м;
- грунты основания: суглинки лессовидные средней плотности, маловлажные, мощность слоя — 4,5 м (глубины 0–4,5 м) и глины маловлажные, мощность слоя — 6,0 м (глубины 4,5–11,5 м) (табл. 1; 2);

Таблица 1. Характеристика грунтов основания [6]

Наименование грунта	Мощность слоя, м	Модуль деформации, МПа	Удельный вес, кН/м ³
суглинки	4,5	10	17,4
глины	6	12	17,8

Таблица 2. Характеристика физико-механических свойств грунтов [6]

W	I_p	I_L	e	φ , град	C_p , кПа	Примечания
0,14...0,2	0,16...0,18	0,32...0,35	0,768...0,701	25...29	16...28	Вторые цифры относятся к большим глубинам

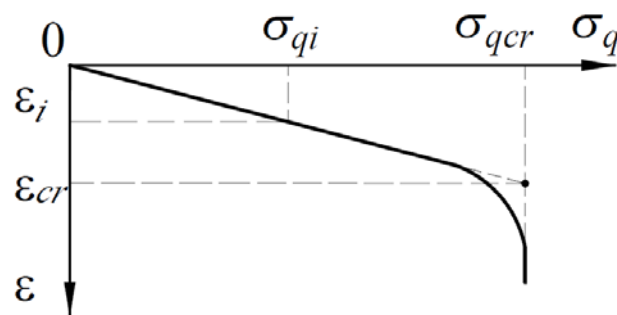


Рис. 3. Характерный график зависимости относительной осадки ε от давления σ_q под подошвой фундамента. ε_{cr} и $\sigma_{q,cr}$ — критические значения (в предельном состоянии) соответственно осадки и давления; ε_i и $\sigma_{q,i}$ — промежуточные значения осадки и давления.

- давление по подошве фундамента: $\sigma_q = 133,6$ кПа;
- глубина заложения фундамента: $h_0 = 1,6$ м;
- ширина подошвы фундамента: $b = 2,0$ м;
- структурная прочность грунта: $\sigma_{str} = 50$ кПа.

В работе [6] выполнены расчеты с использованием нормативного метода послойного суммирования (по программе ES1-OSA, авторы: С. И. Евтушенко и Г. М. Скибин) в пределах глубины сжимаемой толщи 4,0 м. Величина осадки фундамента составила **$S = 1,29$ см.**

Также в работе [6] приведены результаты расчетов по формуле для малозаглубленных фундаментов, учитывающей структурную прочность грунта, предложенной О.Н. Осиповой и В. П. Дыба. Расчеты тоже выполняются путем послойного суммирования. Получено: суммарная осадка **$S = 0,7$ см.**

В ИГЭ РАН ранее была разработана новая технология расчета осадки также с использованием послойного суммирования. В ней учтены структурная прочность грунта каждого слоя, образование в грунтовом основании ядра в виде полукруга радиусом $b/2$ (в вертикальном сечении) и развитие деформаций именно по границам ядра [7]. В соответствии с результатами расчетов по указанной технологии, представленными в работе [7], осадка фундамента шириной 2,0 м составила **$S = 0,92$ см.**

Расчеты осадки по методике, учитывающей образование в грунтовом основании диссипативных геологических структур

Исходные данные: ширина фундамента $b = 2,0$ м; грунтовое основание представлено суглинками до глубины 4,5 м; структурная прочность $\sigma_{str} = 50$ кПа (по исходным данным); удельный вес $\gamma = 17,4$ кН/м³; угол внутреннего трения $\varphi = 25^\circ$; соответственно $m = tg^2(45 - \varphi/2) = 0,406$; сцепление $c = 16$ кПа; $\sigma_{q,i} = 133,6$ кПа; $m^2 = 0,165$.

Определяется по (4) $\sigma_{q,cr} = \gamma \cdot b(1/m^2 - 0,866) + \sigma_{str}(1/m + 1) = 353,8$ кПа.

Расчетное значение осадки S_i фундамента по формуле (7):

$S_i = 0,009 \cdot b \cdot \sigma_{q,i} / \sigma_{q,cr} = 0,0068$ м. Или $S_i = 0,68$ см.

Таким образом, расчеты осадки по предложенной методике дали результаты, близкие к данным, полученным по другим методикам, в том числе основанным на послойном суммировании осадок при уплотнении грунтов.

Следовательно, предложенная методика, основанная на новых геологических закономерностях трансформации НДС грунтового основания с образованием в нем крупных структур, согласно проведенным разовым тестовым расчётам осадки, показала работоспособность.

Выполнен также расчетный анализ влияния изменения значений исходных параметров на оценку осадки. Принималось изменение исследуемого параметра на 5% (табл. 3).

Получено, что наибольшее влияние на результаты расчетов оказывают изменения исходных значений угла внутреннего трения. Увеличение (уменьшение) значения φ на 5% вызывает изменение осадки на 7% (в расчете исходное значение осадки 0,68 см изменялось на 0,05 см). Этому есть свое

объяснение. Угол внутреннего трения участвует в значениях m и m^2 в обоих слагаемых в формуле (4) оценки предельного состояния. Действительно, процесс деформирования грунтового основания происходит в грунтах оболочки ДГС — узкой зоне, толщина которой составляет $0,009b$. Основной механизм деформирования — скашивание грунта при повороте ДГС. В этом случае параметры, определяющие сопротивление трению грунта, являются также определяющими в оценке НДС грунтов оболочки и, соответственно, деформируемости грунтового основания.

Заключение

При изучении закономерностей проявления и развития оползней различных типов, установлено, что подготовка нового оползневого блока происходит в виде самоорганизации геологической среды по защите своего исходного состояния от оползневой угрозы (внешнего воздействия). Геологическая среда образует новые крупные структуры (ДГС) с граничными оболочками, ограничивающими область снижения напряжений (давления в точках), запускает механизм взаимодействия с оползневым процессом путём функционирования ДГС и при достижении предельного состояния — отделения ДГС как оползневого блока.

В ИГЭ РАН также рассмотрены механизмы защитной реакции геологической среды с образованием соответствующих ДГС при образовании провала над подземной полостью и выпора грунта из-под подошвы фундамента.

В статье процедурой расчёта осадки предусматривается, что, в соответствии с параметрами фундамента и данными о прочности грунтов, расчётом определяются, с учётом закономерностей защитной реакции геологической среды, предельные значения

Таблица 3. Результаты расчета по формулам (4) и (7) осадки фундамента при изменении одного из расчетных параметров на 5% при исходных значениях остальных

Измененный на 5% параметр	Значения параметров в расчете							
	γ , кН/м ³	b , м	φ , град.	m	σ_{str} , кПа	$\sigma_{q,cr}$, кПа	S_p , см	ΔS_p , см
0,95 φ 1,05 φ	17,4	2	23,75	0,426	50	329,5	0,73	+0,05
	17,4	2	26,25	0,386	50	382,4	0,63	-0,05
0,95 σ_{str} 1,05 σ_{str}	17,4	2	25	0,406	47,5	345,3	0,70	+0,02
	17,4	2	25	0,406	52,5	362,6	0,66	-0,02
0,95 γ 1,05 γ	16,53	2	25	0,406	50	344,9	0,70	+0,02
	18,27	2	25	0,406	50	363,0	0,66	-0,02
0,95 b 1,05 b	17,4	1,9	25	0,406	50	344,9	0,66	-0,02
	17,4	2,1	25	0,406	50	363,0	0,70	+0,02

давления фундамента и осадки грунтового основания. Текущая осадка устанавливается расчётом при допущении линейной зависимости между осадкой и давлением на этапе допредельного состояния грунтового основания.

Результаты тестового примера расчета осадки ленточного фундамента показали, что предлагаемая методика, основанная на природном механизме трансформации НДС грунтового основания с образованием диссипативных геологических структур при достижении предельного давления фундамента,

может применяться, что стимулирует продолжение исследований в данном направлении. В дальнейшем необходимо проведение экспериментальных исследований по выявлению признаков проявления в грунтовом основании диссипативных геологических структур, их оболочек, изменений НДС в грунтах новых образований на этапах допредельного и предельного состояний, изучению особенностей защитной самоорганизации геологической среды при оценке несущей способности и осадки грунтового основания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабков В. Ф., Безрук В. М. Основы грунтоведения и механики грунтов. М., Высшая школа, 1976. 328 с.
2. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Л., Стройиздат, 1988. 415 с.
3. Кашперюк П. И., Лаврусевич А. А., Мартынов А. М. К вопросу о рассмотрении осадки грунтов основания как многофакторного антропогенно обусловленного геологического процесса // Грунтоведение, 2021, №2, С. 29–35.
4. Малышев М. В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. М. Стройиздат, 1980. 136 с.
5. Ольховатенко В. Е., Тимофеев В. С. Нелинейная модель грунтового основания // Инженерная геология. 1992. №6. С. 96–106.
6. Осипова О. Н. Формула для расчета осадки методом послойного суммирования с учетом влияния структурной прочности // Городские агломерации на оползневых территориях. Матер. V междунар. конф. по геотехнике. Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. С. 261–264.
7. Постоев Г. П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.; СПб.: Нестор-история, 2013. 100 с.
8. Постоев Г. П. Модели механизма формирования и расчёта провалов земной поверхности над подземными полостями // Геоэкология, 2020. №4. С. 36–47.
9. Постоев Г. П., Кучуков М. М., Казеев А. И. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 6. С. 22–31.
10. Постоев Г. П. Диссипативные геологические образования и модели оценки предельного состояния грунтовых оснований // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2021. № 2. С. 41–48.
11. Постоев Г. П., Кучуков М. М., Казеев А. И. Поведение грунтов и диссипативных геологических структур при образовании оползневого блока // Грунтоведение, 2022, №2, С. 58–64.
12. Цытович Н. А. Механика грунтов. Изд. 4. М., Госстройиздат, 1963. 636 с.