

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК:624.53

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОЙ ЗАЩИТЫ НЕПОДВИЖНОГО
ОБЪЕКТА ОТ ОПОЛЗНЕВОГО ДАВЛЕНИЯ© 2024 г. Г. П. Постоев¹*, А. И. Казеев¹, М. М. Кучуков¹, Н. А. Орлова¹¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: opolzen@geoenv.ru

Поступила в редакцию 25.09.2023 г.

После доработки 09.11.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Рассматривается методика защиты стационарного неподвижного объекта (опор высоковольтной сети, канатной дороги, эстакады и т.п.) на активном оползневом склоне. Предложен новый подход организации защитных мероприятий. Он основан на выявленных закономерностях формирования в геологической среде новых структур на локальном участке воздействия на нее. В оползневом массиве при надвиге на неподвижный объект возникают диссипативные геологические структуры, как в грунтовом основании под ленточным фундаментом. В частности, образуются граничные оболочки и ядро по контакту с фронтальной поверхностью неподвижного объекта, в соответствии с его параметрами. Предложена методика, обеспечивающая обтекание объекта оползневыми массами и устойчивое его состояние.

Ключевые слова: технология защиты, опасное давление, оползневой массив, неподвижный объект, модель, ленточный фундамент, диссипативная геологическая структура, ядро, буровая скважина

DOI: 10.31857/S0869780924010043, EDN: GNWJTL

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве инженерных объектов на оползневых склонах возникает много проблем с обеспечением устойчивости сооружений и их защитой от оползневых деформаций. Задача стабилизации оползневого склона и предотвращения развития оползневых деформаций требует осуществления большого комплекса дорогостоящих противооползневых мероприятий и возведения удерживающих сооружений, особенно на протяженных береговых участках с длительной историей развития оползневого процесса. Вместе с тем, нередко на участках склонов с развитием оползневого процесса строят неподвижные объекты в виде отдельно стоящих опор высоковольтной сети, канатной дороги, эстакады и т.п., при этом возникает потребность обеспечения локальной защиты неподвижного объекта от влияния оползневых подвижек. Ниже рассматриваются предложения по защитным мероприятиям, позволяющим осуществлять защиту объектов в широком спектре оползневых участков, в том числе при смещении крупных массивов, на основе учета закономерностей образования в оползневом массиве диссипативных геологических структур (ДГС) по контакту с неподвижным объектом.

Известные способы защиты
неподвижного объекта

Обеспечение устойчивости неподвижного объекта на оползневом склоне может быть достигнуто путем устранения оползневых смещений посредством укрепления грунтов склона. Для этой цели применяется для повышения прочности грунтов, например, инъецирование в тело оползня уплотняющего (упрочняющего) раствора [8]. Однако такой способ стабилизации склона может быть эффективен для локальных очагов развития неглубоких оползней. Известен также способ защиты неподвижного объекта, например, в виде сооружения на оползневом склоне перед объектом свайного ростверка, закрепленного в устойчивых грунтах ниже поверхности скольжения и устроенного таким образом, чтобы препятствовать продавливанию оползневых масс в межсвайное пространство и способствовать обтеканию оползневыми массами свай защитного сооружения [2, 7]. К недостаткам данного способа относятся большая трудоемкость и стоимость укрепления склонов (с защитой объектов, расположенных на них) на участках с развитием протяженных относительно глубоких оползней, поскольку для противодействия ожидаемым расчетным величинам оползневого давления потребуются проектирование и устройство

многорядных свайных ростверков между бортовыми границами оползневого участка.

В Кубанском государственном аграрном университете предложен способ (патент SU1647081), предусматривающий снижение оползневого давления на отдельно расположенный объект на оползневом склоне путем бурения скважин и оборудования в них буронабивных свай с созданием стенки, закрепленной в коренных породах в виде складки, вершина которой обращена навстречу перемещению оползня [14]. Защитная стенка воспринимает оползневое давление и направляет движущиеся оползневые массы по боковым сторонам защищаемого объекта для его обтекания. Способ может быть достаточно эффективен при использовании на склонах с развитием относительно неглубоких оползней в покровных разуплотненных отложениях, в которых вследствие малой прочности грунтов обтекание объекта оползневыми массами может быть обеспечено, тогда как на участках развития глубоких оползней с деформированием прочных коренных глин его применение может быть затруднено. Смещение оползневого массива происходит как перед защитной стенкой, так и на участке между стенкой и неподвижным объектом, вызывая рост давления на его фронтальную часть.

Следует отметить, что в оползневом массиве перед неподвижным объектом возникает перестройка напряженно-деформируемого состояния (НДС) смещающихся масс с образованием новых структур, которые влияют на процессы взаимодействия грунтов с объектом.

ОСНОВЫ НОВОГО ПОДХОДА К ЗАЩИТЕ ЛОКАЛЬНОГО НЕПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

В ИГЭ РАН выявлены закономерности образования в геологической среде диссипативных геологических структур (ДГС), как защита ее исходного НДС от внешнего силового возмущения. ДГС формируются вследствие разгрузки напряжений при образовании оползневого блока [10, 12], а также провала над подземной полостью [11] и в грунтовом основании под нагрузкой от фундамента [9].

К настоящему времени получены уравнения предельного состояния ДГС в грунтовом массиве перед развитием разрушительных деформаций. Найден геологический критерий 0.009, который регламентирует преобразование НДС геологической среды в целях защиты от воздействующего геодинамического процесса с переходом от НДС в точках массива по Кулону-Мору к НДС в грунтах граничной оболочки новой крупной структуры (ДГС) [9, 12].

На определенном этапе функционирования ДГС осуществляет вращательное движение, при котором грунты, находящиеся в узкой зоне граничной оболочки, деформируются в режиме скашивания, и при

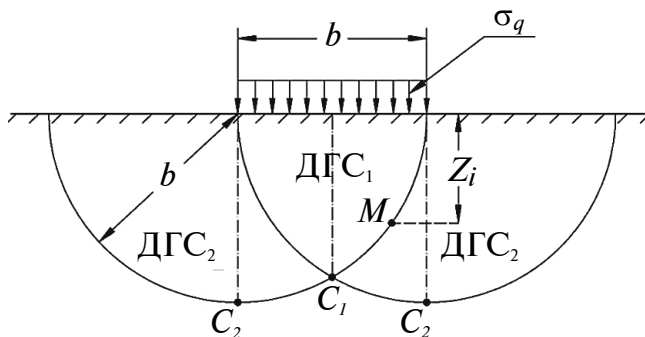


Рис. 1. Схема расположения диссипативных геологических структур в грунтовом основании под нагрузкой от ленточного фундамента шириной b . σ_q — давление на грунтовое основание под подошвой фундамента; ДГС₁ и ДГС₂ — диссипативные геологические структуры в грунтовом основании.

достижении угла поворота 0.009 радиан, когда угол скашивания становится равным 45°, происходит разрушение грунта с разрывом структурных связей, образование поверхности сдвига одновременно для всей ДГС и ее разрушительное вращательное смещение в виде оползневого блока [12].

Оползневой массив отделен от коренной части геологической среды граничными поверхностями отрыва, скольжения. В нем формируется отличное от коренного массива НДС, связанное с режимом движения отделившихся грунтовых масс. Это состояние является исходным для оползневой массы, как части геологической среды, с проявлением закономерностей по сохранению установившегося НДС.

Неподвижный объект на активном оползневом склоне может рассматриваться как локальное внешнее воздействие, угрожающее изменению исходного состояния смещающегося массива. Проявляется защитная реакция по ограничению влияния объекта на исходное состояние массива, с образованием локальных ДГС по контакту с неподвижным объектом.

Модель неподвижного объекта

Исследования показали, что в качестве модели-аналога неподвижного объекта на активном оползневом склоне может быть рассмотрен ленточный фундамент, нагрузка от которого на грунтовое основание вызывает локальную защитную реакцию геологической среды. Под ленточным фундаментом по мере увеличения нагрузки от сооружения развиваются деформации грунтового основания, при этом в нем образуется ДГС с формированием ядра под подошвой фундамента [9]. А на неподвижный объект происходит надвигание грунтов оползневой массы, в результате которого в итоге возникает горизонтальное давление на его фронтальную поверхность, при этом при обтекании

объекта оползневые массы воздействуют на него и его боковые поверхности.

То есть взаимодействие массива и объекта *подобно надвиганию объекта на неподвижный оползневой массив, что имеет место в модели ленточного фундамента при росте давления на грунтовое основание*. По фронтальной поверхности объекта возникает лобовое давление (как под ленточным фундаментом), а по боковым границам имеет место обтекание объекта грунтовыми массами (соответственно — пластические деформации по краям фундамента, осадки и выпор грунтового основания). У ленточного фундамента его длина превышает ширину в 10 и более раз (в плане). И заглубленная часть неподвижного объекта также имеет подобное соотношение в вертикальном сечении.

Таким образом, смещающийся (подвижный) оползневой массив является геологической средой, на которую заглубленный неподвижный объект оказывает внешнее давление (воздействие), вызывая образование в оползневом массиве локальных ДГС (как защитной меры для ограничения зоны влияния объекта в пределах ДГС и сохранения установившегося режима формирования НДС в остальной части оползневого массива).

По аналогии с ленточным фундаментом (в данном случае расположенным вертикально, в соответствии с ориентацией и размерами объекта) в оползневом массиве формируются схожие геологические структуры с центральным ядром у фронтальной поверхности объекта (рис. 1, ДГС₁) [9].

По границам ядра и боковым поверхностям фундамента (как неподвижного объекта) происходит основной процесс развития пластических деформаций (обтекание объекта). По обеим сторонам ядра (ДГС₁) по мере повышения давления на фронтальную поверхность объекта формируются боковые ДГС (см. рис. 1, ДГС₂), параметры которых зависят от размеров объекта, в частности ширины b контура его фронтальной части.

Уплотнение грунтов в ДГС практически не происходит. Процессы изменения напряжений и деформаций концентрируются по границам структур. Вначале, как указано выше, деформации концентрируются по границам ядра ДГС₁ под подошвой фундамента (у фронтальной поверхности объекта). Боковые структуры ДГС₂ оказывают сопротивление горизонтальному давлению при перемещении центрального ядра (сдвигения оползневых масс по его границам), играя роль пассивного отпора окружающего грунта. Под фундаментом наземного сооружения (см. рис. 1) начинается процесс выпора боковых зон ДГС₂ из-под его подошвы с разрушительными деформациями в виде просадки сооружения. При этом боковые зоны, как и ядро, смещаются блоками практически с исходной структурой грунтов по криволинейным (в сечении — круговым) границам, по которым

в оболочке ДГС происходит разрыв структурных связей грунта с потерей структурного сцепления и образованием поверхностей сдвига. В ситуации “объект на оползневом склоне” формирование боковых зон заканчивается, когда достигается предельное лобовое давление на фронтальную поверхность неподвижного объекта.

Для ленточного фундамента уравнение предельного равновесия имеет вид [9]:

$$\frac{\gamma b}{m} + \sigma_{str} = (0.866\gamma b - \sigma_{str} + \sigma_{q, cr})m, \quad (1)$$

откуда

$$\sigma_{q, cr} = \gamma b \left(\frac{1}{m^2} - 0.866 \right) + \sigma_{str} \left(\frac{1}{m} + 1 \right), \quad (2)$$

где $\sigma_{q, cr}$ — предельное значение давления на грунтовое основание под подошвой фундамента; γ — среднее значение удельного веса грунтов основания толщи на уровне точек C_2 ; b — ширина фундамента; $m = \lg^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right)$; σ_{str} и ϕ — значения структурной прочности и угла внутреннего трения (для грунта на уровне точек C_1 и C_2 , см. рис. 1).

При взаимодействии оползневого массива и неподвижного объекта также формируются соответствующие ДГС в движущемся массиве (как и под фундаментом), что позволяет использовать уравнение (1) для анализа НДС в локальной зоне массива перед объектом. Из (1) следует, что предельное давление на фронтальную поверхность объекта зависит от величины удельного веса грунтов, ширины объекта, структурной прочности и угла внутреннего трения грунта. При заданных параметрах объекта снижение γ , σ_{str} , ϕ по границам ядра ДГС₁ способствует развитию деформаций по ним и уменьшению давления на фронтальную поверхность объекта. При образовании ДГС в грунтовом массиве основные напряжения и деформации концентрируются в грунтах оболочки по границам структур. То есть, как и в грунтовом основании, в оползневом массиве перед неподвижным объектом деформации концентрируются в грунтах оболочки ядра (в режиме сжатия), причем на допредельном этапе зависимость между деформациями и давлением линейная [9, 12].

По достижении предельного давления на фронтальную поверхность структурное сцепление в грунтах граничной оболочки становится равным нулю. Последующие деформации по границам ядра происходят в виде сдвига с преодолением сил трения, зависящих от величины угла ϕ (этап аномального проседания фундамента). Однако в ситуации с возникновением предельных значений давления на неподвижный объект с проявлением резкой активизации деформаций (в виде “обтекания”) не допустимы для обеспечения устойчивости

и безопасного функционирования проектируемых (существующих) сооружений.

Новые предложения по защите неподвижных объектов на оползневом склоне

На основе выявленных природных закономерностей преобразования НДС геологической среды на участке внешнего силового воздействия на нее, в частности с учетом использования результатов исследований системы “ленточный фундамент — грунтовое основание”, разработана технология защиты неподвижного заглубленного объекта от опасного оползневого давления. Предлагаемая технология осуществляется путем управляемого формирования допускаемого снижения оползневого давления на объект для обеспечения его устойчивости.

Для этой цели выявляются параметры ДГС, которые возникают на участке взаимодействия неподвижного объекта с оползневой массой (рис. 2). В соответствии с системой “ленточный фундамент — грунтовое основание”, как модели-аналога для системы “неподвижный объект — оползневой массив”, на участке размещения объекта определяют границы ДГС, в том числе ядра (в плане), согласно ширине b объекта (по его контуру, нормальному к вектору смещения оползневой массы).

Затем для обеспечения устойчивости объекта и безопасности его функционирования посредством бурения скважин в грунтах граничной оболочки ДГС-ядра контролируют развитие процессов обтекания неподвижного объекта грунтами при смещении оползневой массы.

Предлагаемая технология предназначена для обеспечения устойчивости и безопасного функционирования отдельно стоящих неподвижных объектов на участке активного оползня, в том числе с глубоким расположением поверхности скольжения в прочных коренных глинах, в оползневых очагах преимущественно с развитием оползневой типа сжатия-выдавливания. Особенностью блоковых оползней указанного типа является сохранение активных подвижек оползневой тела по почти горизонтальной поверхности скольжения в течение длительного периода времени. При этом смещение продолжается до тех пор, пока дневная поверхность (верхняя площадка) отделившегося от коренного массива оползневой блока не достигнет уровня сформировавшейся оползневой террасы, определяя завершение оползневой цикла на данном участке склона. При естественном развитии оползневой процесса продолжительность цикла активного состояния смещающегося массива может составлять десятки и сотни лет. Это означает, что необходимо обеспечить устойчивость неподвижного объекта (например, опоры дорожной эстакады) на активном оползне в течение длительного времени.

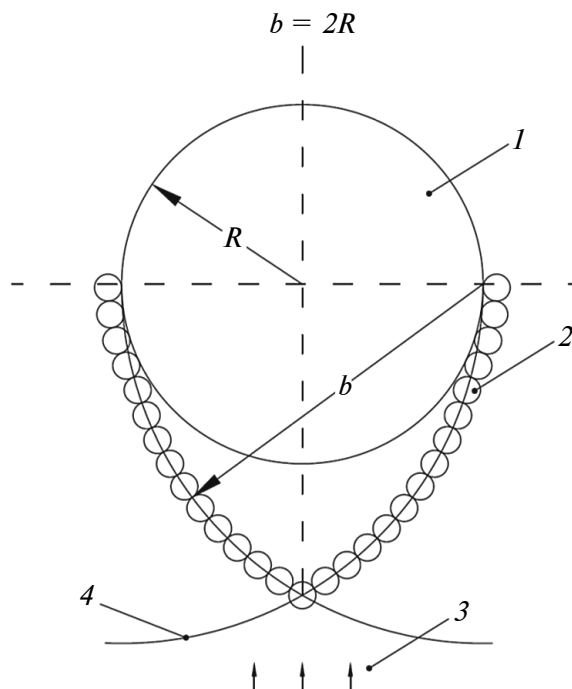


Рис. 2. Положение в плане неподвижного объекта в виде круглой сваи. 1 — неподвижный объект шириной $b = 2R$, 2 — скважина, 3 — направление движения оползневой массы, 4 — граничная поверхность (оболочка) диссипативной геологической структуры.

Обоснование новой технологии

По мере движения оползневой массы увеличивается давление на фронтальную поверхность неподвижного объекта, и растет сила трения по боковым поверхностям объекта при его обтекании оползневой массой. Исследования несущей способности горизонтально нагруженной сваи показали, что доля сил трения в общей величине несущей способности достигает 36% при горизонтальной нагрузке, составляющей 1/3 от предельного значения, затем с ростом нагрузки процентное соотношение постепенно снижается до 10% при предельной несущей способности [1]. Соотношение 10% остается практически постоянным в условиях продолжения дальнейшего смещения грунтов вдоль боковой поверхности объекта.

По данным экспериментальных исследований установлено, что при небольших скоростях нагружения различие результатов испытаний грунта методами ПСН (постоянной скорости нагружения) и ПСД (постоянной скорости деформирования) находятся в допустимых пределах [6]. Также отмечено, что “деформация грунта дискретна, локализована возле группы наиболее крупных пор” [6], и это определяет важность изучения структурных элементов грунтового массива.

Таким образом, на активном оползневом склоне вследствие смещения оползневой массы неизбежно его силовое воздействие на неподвижный

объект, закрепленный в устойчивых грунтах, расположенных ниже поверхности смещения оползня. Лобовое давление оползневых масс на объект должно быть как минимум выше структурной прочности (предела прочности на одноосное сжатие) грунта, чтобы начались деформационные процессы и обтекание объекта. В соответствии с нормативными документами (СП 50-101-2004¹), расчетное сопротивление глинистых грунтов оснований (практически среднее значение лобового давления на объект) в зависимости от их пористости и состояния текучести находится в пределах 0.1–0.5 МПа.

Оползневое давление на участках развития глубоких блоковых оползней, в связи с достаточно высокой прочностью и плотностью грунтов оползневого массива, может создать опасные горизонтальные нагрузки на объект. Как показали испытания на сдвиг и одноосное сжатие образцов меотических глин, отобранных на оползневых склонах Одессы [4], при напряжениях τ , не превышающих 80% предельных значений (применительно к длительному периоду изменения напряжений в массиве, что имеет место в развитии глубоких оползней), существенных изменений НДС грунтового слоя массива происходить не может (рис. 3).

То есть, с одной стороны, независимо от скорости нагружения или скорости деформирования грунта при допредельных значениях напряжений рано или поздно все же наступает этап, когда предельное состояние достигается, в результате чего возникают разрушительные деформации. С другой стороны, при меньшей скорости деформирования грунта и интенсивности роста давления на грунт период допредельных изменений деформаций и напряжений возрастает.

При анализе формирования НДС в грунтах вблизи неподвижного объекта на оползневом склоне следует также иметь в виду, что его обтекание оползневыми массами происходит в основном по боковой поверхности [7], при этом, как указано выше, силы трения составляют ~10% в общей величине несущей способности сваи на горизонтальное давление [1].

Особенности учета ДГС при надвиге оползневых масс на неподвижный объект

Научные и экспериментальные исследования, анализ результатов натурных наблюдений за развитием разрушительных деформаций на участках проявления блоковых оползней показывают, что относительное значение критической деформации (при предельном давлении $\sigma_{q, cr}$), предшествующее разрушительному процессу смещения грунтов, составляет 0.009 [3, 9, 12]. Применительно

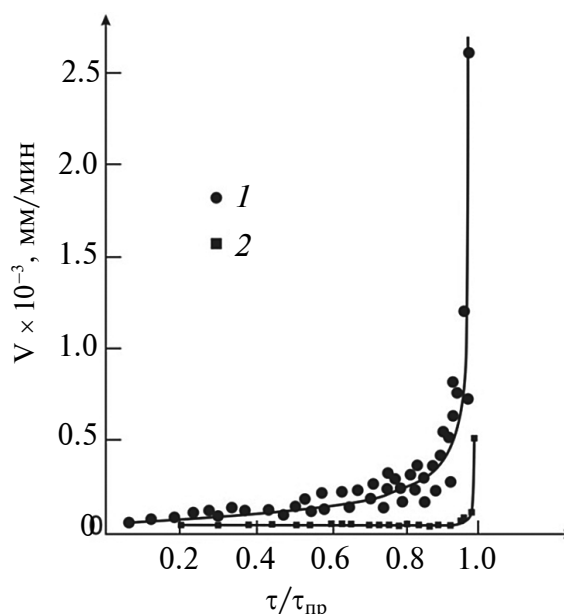


Рис. 3. Графики зависимости скорости ползучести от уровня напряжений при различном темпе нагружения глинистого грунта в испытаниях на сдвиг [4]. 1 — испытание по схеме ступень — час, 2 — по схеме ступень — сутки.

к взаимодействию оползневого массива и неподвижного объекта в допредельном режиме в процессе движения оползня давление на фронтальную поверхность объекта увеличивается от значения давления грунта в точке (в начальный момент) до предельного давления, предшествующего процессу интенсивного обтекания объекта (по аналогии разрушительных деформаций фундамента).

Исходное давление грунта на неподвижный объект (по аналогии с моделью “фундамент — грунтовое основание”) определяется как давление p_i грунта в точке массива на глубине Z_i (см. рис. 1) [9–12]:

$$p_i = (\gamma Z_i - \sigma_{str, i}) \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_i}{2} \right). \quad (3)$$

Ядро ДГС₁, так же как и объект, находится в неподвижном состоянии (см. рис. 1). При движении оползневого массива по границе ядра формируется оболочка толщиной h , в соответствии с геологическим критерием 0.009 [9, 12]:

$$h = 0.009b. \quad (4)$$

Оболочка представляет собой узкую зону (при $b = 2$ м, $h = 0.018$ м), в грунтах которой в условиях компрессионного сжатия происходят основные изменения НДС в новой ДГС, как в замкнутом крупном образовании в геологической среде, в данном

¹ СП 50-101-2004 “Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений”.
<https://docs.cntd.ru/document/1200038307>

случае — в оползневом массиве (специфической части геологической среды). В грунтах оболочки (в узкой зоне) и особенно ядра ДГС₁ возникают напряжения, в 1/0.009 раз (т.е. более чем на два порядка) превышающие давление в точке по (3).

Таким образом, в движущемся оползневом массиве перед неподвижным объектом шириной b возникают ДГС (см. рис. 1, 2), по границам которых происходит концентрация напряжений, определяющих условия деформирования грунтов в оболочке в режиме скашивания. По мере деформации грунтов в оболочке увеличивается давление оползневого массива на неподвижный объект. Критическое значение давления $\sigma_{q, cr}$, в соответствии с (2), достигается, когда перемещение в оболочке ДГС₁ становится равным $\Delta l = h = 0.009b$ [9, 12].

Технология выполнения работ

На склоне с развитием глубоких подвижек оползневого массива в виде крупных блоков с частично сохранившейся исходной структурой грунтов коренного залегания планируется строительство неподвижного локального объекта, заглубленная часть которого закреплена в прочных грунтах ниже поверхности скольжения оползня. По данным инженерных изысканий, проектных решений и мониторинга развития оползневых деформаций на оползневом склоне, в соответствии с нормативными документами, определяют: тип оползня по механизму, направление и среднюю скорость смещения оползневого массива, глубину положения в разрезе поверхности скольжения на участке расположения неподвижного заглубленного объекта.

По формуле (3) определяют исходное значение давления на глубине Z_i в точке массива, в том числе на неподвижный объект при отсутствии деформаций оползневого массива (как бы при расположении объекта в устойчивом массиве). По данным мониторинга выявляют активность оползневого процесса на участке, наличие деформаций грунтов перед объектом. Надвигание оползневого массива на неподвижный объект вызывает деформирование грунта в граничных оболочках ДГС, возникших перед объектом.

В целях предотвращения роста давления на неподвижный объект до опасных значений и обеспечения безопасного обтекания объекта оползневыми массами выполняют следующее процедуры и мероприятия.

Определяют параметры локальных ДГС перед неподвижным объектом. Перед сечением заглубленной части фронтальной поверхности объекта размечают расчетные границы ДГС-ядра в виде дуг окружностей радиусом b (дуги — как границы ДГС₁, на рис. 2), с центрами в краевых точках фронтальной поверхности контура b , и расчетных дуг расположения центров буровых скважин радиусом

$$\left(b + \frac{d}{2}\right), \quad (5)$$

где d — диаметр скважины, м.

Протяженность каждой из расчетных дуг от основания шириной b до точки пересечения дуг на оси ядра, удаленной от основания на расстояние $0.866b + d/2$, равна:

$$L = \frac{\pi \left(b + \frac{d}{2}\right)}{3}. \quad (6)$$

Устанавливается расположение скважин перед фронтальной поверхностью объекта, с размещением осей скважин по границе ДГС-ядра. Количество скважин, стенки которых касаются между собой, определяют по формуле:

$$n = \frac{2\pi \left(b + \frac{d}{2}\right)}{3d}. \quad (7)$$

Определяют время, в течение которого обеспечивается безопасное значение оползневого давления на неподвижный объект и возможность его обтекания оползневыми массами:

$$t = \frac{d}{v}, \quad (8)$$

где t — время безопасного функционирования неподвижного объекта, мес; d — диаметр скважины, м; v — средняя скорость смещения оползня в течение периода t , м/мес.

По границам ядра (см. рис. 2) осуществляют бурение скважин, диаметром d каждая, до глубины залегания поверхности скольжения в данном месте оползневого массива, при этом оси скважин располагают по дуге $(b + d/2)$, а стенки скважин касаются друг с другом и с внутренней границей оболочки ДГС в виде дуги радиусом b .

В соответствии с результатами теоретических исследований толщина h оболочки по границе ДГС-ядра (см. рис. 2) составляет $h = 0.009b$. Полости скважин увеличивают толщину граничной оболочки ДГС-ядра, преобразуют деформирование грунта по границе ДГС-ядра в сжатие и скашивание пустот, образованных скважинами. При этом снижается сопротивление грунта сдвигу по граничной оболочке ДГС и боковой поверхности объекта.

Смещение оползня вызывает смятие пустот по граничной расширенной оболочке ДГС, образованной скважинами, без роста давления грунтов на фронтальную поверхность глубинной части неподвижного объекта в пределах мощности оползневого тела. При этом ядро, как и неподвижный объект, остается в исходном стабильном состоянии с сохранением исходного давления в грунтах внутри ядра и на поверхности объекта, обеспечивая его устойчивость в массиве. Деформации в этой части

грунтового массива происходят только по границе ядра в виде сжатия, смятия и скашивания полостей скважин, сдвигов грунта, обтекания массива ДГС-ядра и неподвижного объекта. Наличие пустот позволяет снизить сопротивление обтеканию путем смятия пустотных объемов и предотвратить формирование опасного горизонтального давления на фронтальную поверхность объекта. Для предотвращения заплывания пробуренных скважин грунтом можно вставить в них пластиковые трубы.

На фронтальной поверхности неподвижного объекта могут быть установлены датчики для контроля изменений контактного давления оползневого массива на него. При этом по данным о повышении давления, установленного по результатам контроля, можно регулировать сроки бурения скважин и их количество (начиная с меньшего количества скважин).

По границам ДГС-ядра перед объектом и по боковым поверхностям объекта могут производиться работы по повышению эффективности их обтекания оползневыми массами, например, путем инъекции в грунты нейтральной смеси или применения других средств, позволяющих снизить сопротивление трению в грунтах в зоне сдвига.

Следует отметить, что согласно модели “фундамент — грунтовое основание” (см. рис. 1) на допредельном этапе деформирования, когда $\sigma_{q,i} < \sigma_{q,cr}$, абсолютные значения текущей осадки S фундамента и, соответственно, деформаций ДГС весьма малы, и при ширине ленточного фундамента $b = 2$ м критическое значение осадки (при $\sigma_{q,i} = \sigma_{q,cr}$) составит всего $S_{cr} = 0.018$ м, согласно критерию:

$$S_{cr} = \Delta l_{cr} = h = 0.009b. \quad (9)$$

При этом текущие значения смещений будут еще меньше (миллиметры).

Для определения предельной величины давления ленточного фундамента шириной b на грунтовое основание по уравнению (2) требуется информация о механических свойствах (включая γ , ϕ , c и σ_{str}) грунтов (на глубине $Z_i \approx b$ по рис. 1), или в соответствии с предлагаемым способом в оползневом массиве — на расстоянии b от фронтального контура неподвижного объекта. Принимая линейную зависимость (в модели) между давлением фундамента σ_q и относительной его осадкой на допредельном этапе состояния грунтового основания, и переходя к взаимодействию оползневого массива и неподвижного объекта, можно определить текущее значение S_i перемещения оползневого массива в соответствии с критерием (9) и уравнением (2):

$$S_i = \Delta l_i = \frac{0.009b \sigma_{q,i}}{\sigma_{q,cr}}, \quad (10)$$

при этом основные деформации на допредельном этапе происходят по границам ядра (см. рис. 1, 2).

Пример расчета при реализации предлагаемой технологии на конкретном объекте

Например, на оползневом склоне создается неподвижный объект — опора в виде сваи диаметром 2 м, заглубленной в устойчивые коренные породы. По данным изысканий и мониторинга по оползневому склону получена следующая информация:

- мощность оползня у сваи — 10 м;
- средняя скорость смещения оползня 0.2×10^{-3} м/мес;
- характеристики прочности грунтов: угол внутреннего трения $\phi = 14.5^\circ$; сцепление $c = 99.5$ кПа; структурная прочность, соответственно, $\sigma_{str} = 257.5$ кПа.

Предельное значение горизонтального давления на сваю диаметром 2 м при указанных выше параметрах прочности грунта по (2) составит $\sigma_{q,cr} = 763.6$ кПа.

Геостатическое давление на сваю при указанных выше показателях прочности грунта в исходном состоянии, определяемое как давление в точке грунта по (3) в пределах мощности массива до глубины 10 м практически отсутствует, так как компенсируется прочностью структурных связей.

Песчаная засыпка пазух, образуемых при бурении скважин, согласно СП 11-105-97² имеет $\gamma = 16$ кН/м³; $\phi = 28^\circ$. При таких характеристиках давление грунта по (3) на глубине 10 м составит 57.8 кПа. А при допущении среднего значения удельного веса грунтов засыпки 20 кН/м³ соответствующее давление по (3) составит 72.2 кПа. В этом случае можно принять, что допускаемое давление ($|\sigma_q|$) оползневых масс не должно превышать $0.1\sigma_{q,cr}$, т.е. $|\sigma_q| \approx 76$ кПа.

В результате движения оползня перед неподвижной свайей формируется ДГС-ядро. Основанием ядра является диаметр сваи 2 м, нормально ориентированный к направлению смещения оползневого массива. Устанавливаются границы ядра — дуги окружностей радиусом 2 м с центрами в краевых точках упомянутого диаметра, длина каждой дуги составляет $\pi b/3 = 2.09$ м.

При отсутствии инженерной защиты горизонтальное давление $\sigma_{q,i}$ на сваю достигнет критического значения $\sigma_{q,cr}$ при смещении оползня у сваи на величину $0.009b$ (или 18 мм) и средней скорости 0.2×10^{-3} м/мес через 7.5 лет. Но допускаемое значение горизонтального давления $|\sigma_q|$, при той же скорости смещения оползня, может реализоваться гораздо раньше. При $|\sigma_q| = 0.1\sigma_{q,cr}$ этот срок может составить 9 месяцев.

При бурении скважин по границам ядра происходит разгрузка исходного распорного давления в ядре как по его границам, так и по фронтальной

² <https://docs.cntd.ru/document/1200037607>.

поверхности объекта, вследствие снижения напряжений в точках массива ядра в сторону разгрузочных скважин и, соответственно, снижения отпора.

Итак, скорость смещения оползня $v = 0.2 \cdot 10^{-3}$ м/мес.; ширина объекта $b = 2$ м; значение допускаемого давления $[\sigma_q] = 0.1\sigma_{q, cr} \approx 76$ кПа; диаметр скважин, расположенных по контуру ядра, $d = 146 \cdot 10^{-3}$ м. Стенки скважин касаются друг друга и границ ядра с внешней стороны.

Таким образом, при количестве скважин по (7), равном 31 шт., продолжительность периода, в пределах которого обеспечивается безопасное значение горизонтального давления на сваю, составит $t = d/v = 60$ лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая технология оперативной защиты стационарного неподвижного объекта (опор высоковольтной сети, канатной дороги, эстакады и т.п.) на активном оползневом склоне.

Новый подход к организации защитных мероприятий базируется на выявленных закономерностях самоорганизации геологической среды на участке внешнего силового воздействия. На оползневом склоне в качестве исходной геологической среды выступает оползневой массив. Оползневой массив отделен от коренной части геологической среды граничными поверхностями скольжения (отрыва). В нем формируется НДС, отличное от НДС коренного массива, связанное с режимом движения отделившихся грунтовых масс. Это состояние является нормальным для оползневого массива, как части геологической среды с проявлением закономерностей по сохранению установившегося НДС.

Неподвижный объект на активном оползневом склоне может рассматриваться как локальное внешнее воздействие, угрожающее изменению исходного состояния смещающегося массива. Проявляется защитная реакция по ограничению влияния объекта на исходное состояние массива — образование локальных ДГС в оползневом массиве по контакту с неподвижным объектом.

В качестве модели-аналога неподвижного объекта рассмотрен ленточный фундамент, и использованы установленные для него закономерности по оценке предельного давления, образования ДГС-ядра и функционирования ДГС в динамике взаимодействия фундамента (неподвижного объекта) и грунтового основания (оползневого массива у границы с объектом).

Предложенная технология предусматривает бурение скважин по установленной граничной поверхности ДГС-ядра с образованием пустот для снижения сопротивления движению оползневых масс и обеспечения оттекания неподвижного

объекта грунтами без повышения оползневого давления на него до опасных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буслов А. С., Зехниев Ф. Ф., Бакулина А. А., Моховиков Е. С., Монахов И. А. К вопросу о влиянии поперечного сечения горизонтально нагруженной сваи на суммарные величины бокового отпора и трения грунта // Вестник НИЦ "Строительство". 2017. № 2 (13). С. 155–166.
2. Гинзбург Л. К. Противооползневые удерживающие конструкции. М.: Стройиздат, 1979. 80 с.
3. Демин А. М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009. 79 с.
4. Жихович В. В. О наличии оползней выдавливания на склонах одесского побережья // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 5. С. 7–11.
5. Казанкова Э. Р., Корнилова Н. В. Структурирование геологической среды на различных уровнях организации // Актуальные проблемы нефти и газа. Вып. 1(20). 2018. С. 1–15.
6. Кравченко Э. В., Денисенко В. В., Будагов И. В., Ляшенко П. А. Анализ методов испытаний грунтов постоянной скоростью нагружения и постоянной скоростью деформации // Оценка свойств грунтов и работы фундаментов в геотехническом строительстве. Краснодар: КубГАУ, 2018. С. 36–44.
7. Маций С. И. Противооползневая защита: монография. Краснодар: АлВи-дизайн, 2010. 288 с.
8. Осипов В. И., Филимонов С. Д. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом "Геокомполит" // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. № 5. С. 15–21.
9. Постоев Г. П. Диссипативные геологические образования и модели оценки предельного состояния грунтовых оснований // Геоэкология. 2021. № 2. С. 41–48.
10. Постоев Г. П. Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней // Инженерная геология. Т. XIII. 2018. № 3. С. 54–61.
11. Постоев Г. П. Модели механизма формирования и расчета параметров провалов земной поверхности над подземными полостями // Геоэкология. 2020. № 4. С. 36–47.
12. Постоев Г. П., Казеев А. И., Кучуков М. М. Поведение грунтов и диссипативных геологических структур при образовании оползневого блока // Грунтоведение. 2022. № 2. С. 58–64.
13. Пригожин И. Р., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Едиториал УРСС, 2003. 312 с.
14. Противооползневое сооружение. А.с. SU1647081. 1991. Авторы: К. Ш. Шадунц, С. И. Маций, В. В. Елистратов

NEW TECHNOLOGY OF PROTECTING A STATIONARY ENGINEERING STRUCTURE FROM LANDSLIDE PRESSURE

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

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

[#]*E-mail: opolzen@geoenv.ru*

The methodology of protecting stationary objects (foundations of high-voltage network, cable road, overpasses, etc.) located on an active landslide slope is considered. A new approach to implementation of protective measures is proposed. It is based on the identified features of formation of new geological structures in the ground massif at the local area of technogenic impact. Dissipative geological structures develop in the landslide massif upon its thrusting on a immobile object. In particular, a core and boundary envelopes are formed at the contact with the frontal surface of the object, in accordance with the parameters of the latter. A methodology is proposed to ensure the flow of landslide masses around the object and its stability.

Keywords: *protection technology, hazardous pressure, landslide massif, immobile object, model, strip foundation, dissipative geological structure, core, borehole*

REFERENCES

1. Buslov, A.S., Zekhniev, F.F., Bakulina, A.A., Mokhovikov, E.S., Monakhov, I.A. [To the question of the influence of the cross-section of a horizontally loaded pile on the total values of lateral repulsion and soil friction]. *Vestnik NITs "Stroitel'stvo"*, 2017, no. 2(13), pp. 155–166. (in Russian)
2. Ginzburg L.K. [Landslide-control retaining structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 80 p. (in Russian)
3. Demin, A.M. [Landslides in quarries: analysis and forecast]. Moscow, GEOS Publ., 2009, 79 p. (in Russian)
4. Zhikhovich V.V. [About extrusion landslides on the slopes of Odessa coast]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2007, no. 5, pp. 7–11. (in Russian)
5. Kazankova, E.R., Kornilova, N.V. [Structuring of geological environment at different levels of organization]. *Aktual'nye problemy nefii i gaza*, 2018, vol. 1(20), pp. 1–15. (in Russian)
6. Kravchenko, E.V., Denisenko, V.V., Budagov, I.V., Lyashenko, P.A. [Analysis of the methods for testing the soils with constant loading rate and constant strain rate]. In: Collection of articles [Evaluation of soil properties and operation of foundations in geotechnical construction]. Krasnodar, KubGAU Publ., 2018, pp. 36–44. (in Russian)
7. Matsiy, S.I. [Landslide-control measures]. Krasnodar, AIVi-design Publ., 2010, 288 p. (in Russian)
8. Osipov, V.I., Filimonov, S.D. [Compaction and reinforcement of weak soils by the method "Geocomposite"]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2002, no. 5, pp. 15–21. (in Russian)
9. Postoev, G.P. [Dissipative geologic formations and models for estimating the limit state of the ground bases]. *Geoekologiya*, 2021, no. 2, pp. 41–48. (in Russian)
10. Postoev, G.P. [Dissipative structures in the ground massif on the example of deep landslides formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, vol. XIII, no. 3, pp. 54–61. (in Russian)
11. Postoev, G.P. [Models of the formation mechanism and calculation of the parameters of land surface failures over underground cavities]. *Geoekologiya*, 2020, no. 4, pp. 36–47. (in Russian)
12. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. [Behavior of soils and dissipative geological structures during landslide block formation]. *Gruntovedenie*, 2022, no. 2, pp. 58–64. (in Russian)
13. Prigozhin, I.R., Stengers, I. [Order out of chaos]. M., Unitorial Urss Publ., 2003, 312 p. (in Russian)
14. Landslide-control construction. Certificate of authorship SU1647081, 1991, Authors: K.Sh. Shadunts, S.I. Matsiy, V.V. Elistratov (in Russian)