

УДК 624.046.3

Я.А. Сушкова, А.Б. Пономарев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВЫХ УЧАСТКОВ ДОЛИНЫ РЕКИ ЕГОШИХИ В Г. ПЕРМИ

Показана актуальность и необходимость тщательного анализа оползнеопасной ситуации в долине реки Егошихи и выбора средств укрепления критических участков склонов в связи с направленностью проекта и целями инвестора. Проанализированы геоморфологические особенности участка, результаты геологических изысканий и особенности рельефа. Выделены 5 характерных склоновых участков и по каждому из них проведены расчеты двумя независимыми методами: расчет согласно «Рекомендациям по количественной оценке устойчивости оползневых склонов», а также в расчетном комплексе PLAXIS с использованием конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния системы основание – фундамент – сооружение. Определены коэффициенты устойчивости склонов, проанализирована сходимость результатов расчетов различными методами, выявлен оползнеопасный участок и сделаны выводы о необходимости его укрепления.

Ключевые слова: склон, устойчивость, коэффициент устойчивости, грунты.

Проект направлен на освоение долины реки Егошихи в г. Перми, преобразование оврага в оживленный зеленый рекреационный ландшафт в пределах городской черты с сосредоточением объектов культуры [1, 2]. Река Егошиха расположена посреди очень плотной городской территории, она имеет большую глубину и крутые склоны.

Для максимально эффективного использования данного пространства и средств инвестора (особенно актуально, если инвестором выступают государственные структуры) необходима тщательная оценка устойчивости склонов, выявление оползне-опасных участков и подбор оптимальных методов укрепления. С учетом вышесказанного необходимо изучить геоморфологию и инженерно-геологические условия площадки, составить расчетные схемы, провести расчеты выбранных склоновых участков в естественном состоянии, по результатам которых будут выявлены критические участки.

В геоморфологическом отношении площадка расположена в пределах III надпойменной террасы р. Камы, осложненной глубоковрезанной долиной реки Егошихи. Долина реки Егошихи имеет наклонный прямой поперечный профиль, без выраженных террас и крутых склонов.

Теоретически в строении поймы реки принимают участие различные типы аллювиальных отложений. В основании, на контакте с коренными породами, залегает *перлювий* (от лат. *Perluo* – промываю), представленный грубообломочным валунным или галечниковым материалом, возникшим в результате промывания водой осадков, слагающих подмываемый вогнутый берег. Грубообломочный материал может чередоваться с линзами илов, отлагающихся на дне плесов в период межени. Выше перлювия залегает *руслевой аллювий*, представленный преимущественно песчаником и характеризующийся, как правило, хорошо выраженной косой слоистостью. Еще выше залегает *пойменный аллювий*, состоящий из суглинков с нечеткой горизонтальной и слегка волнистой слоистостью. Описанный процесс образования и соотношения различных типов аллювиальных отложений характерен для равнинных рек [3].

Геологическое строение долины реки Егошихи определяют верхнепермские породы (P2), представленные песчаниками, алевролитами, аргиллитами, прикрытые четвертичными аллювиальными и аллювиально-делювиальными отложениями, представленными суглинками. Верхняя часть склона засыпана насыпным грунтом.

По данным архивных материалов «ВерхнекамТИСИЗ» арх. № 2372, 3465, 3601, 4405, геолого-литологический разрез на исследуемой площадке сложен (сверху вниз) следующими грунтами:

ИГЭ-1. Насыпной грунт отсыпан сухим способом и представлен в основном песками, щебнем, шлаком, строительным мусором, слежавшимся, давность отсыпки более 5 лет (отчет 1980 г.). Распространен по всей площадке, мощность 0,3–6,8 м.

ИГЭ-2. Суглинки тугопластичные, мягкопластичные с прослоями твердой и полутвердой консистенции, в подошве слоя с гравием до 10–25 %. Встречен повсеместно. Мощность 2,5–15,8 м.

ИГЭ-3. Суглинки полутвердые, с прослоями песка мелкого, в подошве слоя с гравием 1–5 %. Встречен повсеместно. Мощность 2,0–4,5 м.

ИГЭ-4. Алевролит светло-коричневый слабый, трещиноватый. Сопротивление одноосному сжатию 2 МПа.

ИГЭ-5. Песчаник серовато-коричневый, коричневый, серый, мелко- и тонкозернистый, на глинисто-известковистом цементе, слабый и средней крепости, трещиноватый, обводненный. Встречен повсеместно. Мощность 2,3–8,0 м.

ИГЭ-6. Аргиллит шоколадно-коричневый, вишнево-коричневый, средней крепости, участками, слабый, выветрелый, трещиноватый. Вскрытая мощность до 15 м.

Физико-механические характеристики ИГЭ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики ИГЭ

Параметр	ИГЭ-1	ИГЭ-2	ИГЭ-3	ИГЭ-4	ИГЭ-5	ИГЭ-6
Плотность ρ , г/см ³	1,7	1,64	1,91	2,01	2,11	2,02
Удельный вес γ , кН/м ³	16,7	16,1	18,7	19,7	20,7	19,8
Коэф. пористости e	0,9	0,699	0,704			
Число пластичности I_p , ед.	12,1	13	13			
Степень влажности S_w , ед.	0,58	0,812	0,774	0,2	0,11	0,18
Ест. влажность w , %	0,194	0,234	0,2			
Консист. I_L , ед.	0,05	0,419	0,31			
Угол внутр. трения ϕ , град	18	23	23	31	35	29
Удельное сцепление c , кН/м ²	7	9	9	10	11	6,5
Модуль деф. E , кН/м ²	15000	16500	14000	17700	25000	25000
Коэф. Пуассона ν	0,3	0,415	0,415	0,25	0,3	0,35

Установившиеся уровни грунтовых вод зафиксированы на глубине 3,8–10,6 м или на отметках 112,8–116,0 м – в северной части площадки и 117,9–120,14 м – в южной части площадки (система высот г. Перми).

На площадке планируемого строительства выделено 5 характерных склоновых участков. Геологические разрезы выбранных участков приведены на рис. 1.

Анализ устойчивости склона был проведен с помощью расчетов, выполненных вручную расчетным методом и с использованием программного комплекса PLAXIS.

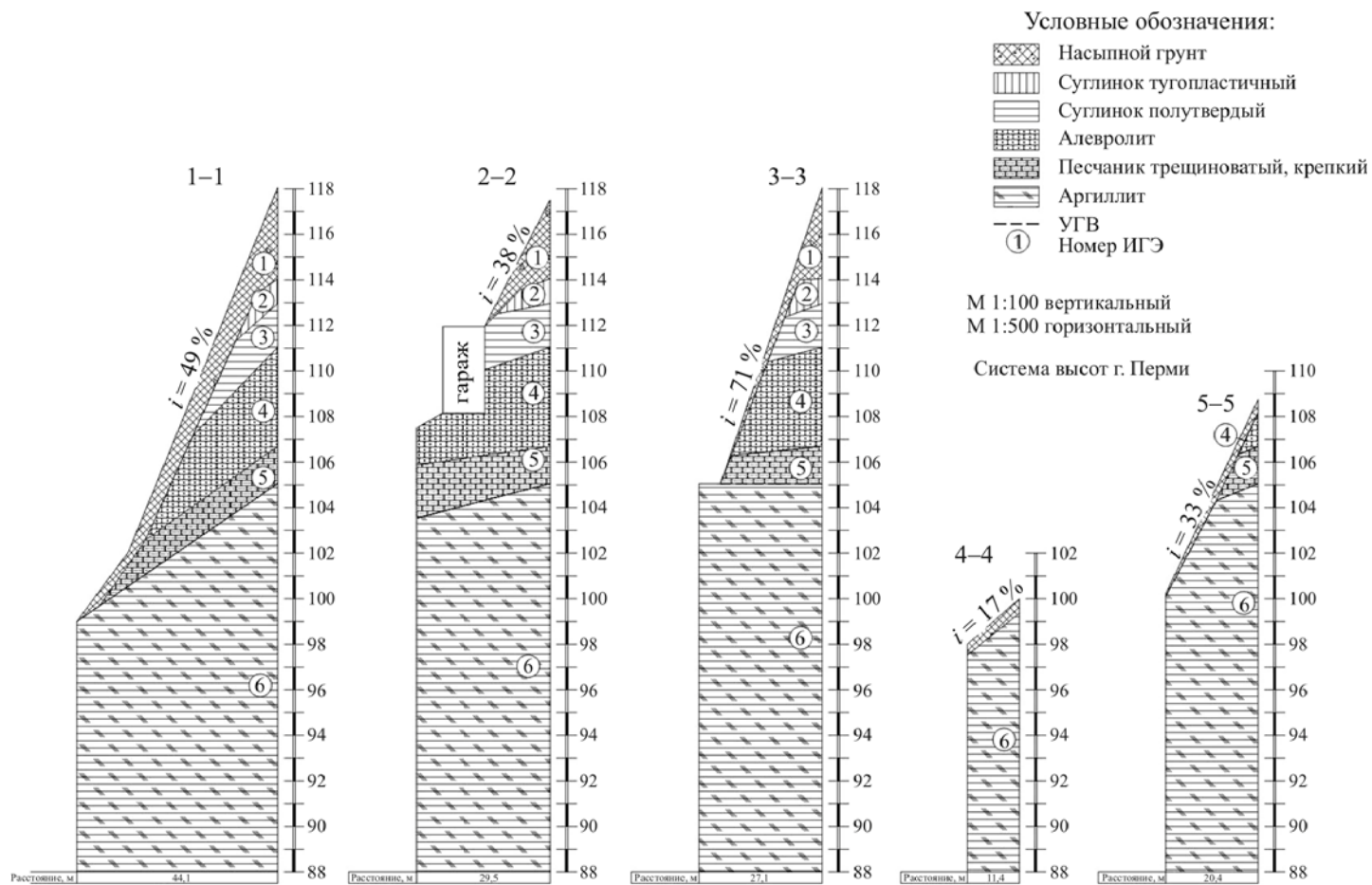


Рис. 1. Инженерно-геологические разрезы склоновых участков

Расчет устойчивости склона произведен согласно «Рекомендациям по количественной оценке устойчивости оползневых склонов» [4] по следующему алгоритму:

1. Находится положение наиболее опасной поверхности скольжения с помощью ряда геометрических построений.

2. Для необводненных уступов и откосов вычисление коэффициента устойчивости для оценки возможности образования срезающих оползней сдвига производится по формуле «алгебраического сложения сил»:

$$K_y = \frac{\sum p_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i \cdot l_i \cdot 1 \text{ м} + \sum p_i \cdot \sin \alpha_i''}{\sum p_i \cdot \sin \alpha_i'},$$

где p_i – вес i -го расчетного отсека, ограниченного вертикальными гранями, МН; α_i' – угол наклона подошвы отсека, град, для участков, где линия скольжения направлена в сторону падения поверхности уступа; α_i'' – угол наклона подошвы отсека, град, для участков, где линия скольжения имеет уклон, обратный падению поверхности уступа; l_i – длина подошвы отсека, м; φ_i, c_i – соответственно угол внутреннего трения, град, и сцепление, МПа, для пород, определяющих величину сопротивления сдвигу по подошве отсека.

Для непригруженных отсеков вес отсека $p_i = V_i \cdot \gamma_i \cdot 1 \text{ м}$, где V_i – площадь сечения отсека, м²; γ_i – средний удельный (объемный) вес в пределах отсека, МН/м³.

3. При наличии фильтрационных сил в условиях отсутствия сейсмических воздействий K_y вычисляется следующим образом:

$$K_y = \frac{\sum [p_i' \cdot \cos \alpha_i + y_e \cdot \omega_i \cdot l_i \cdot \cos(\beta_i - \alpha_i) \cdot 1 \text{ м}] \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum c_i \cdot l_i \cdot 1 \text{ м} + \sum p_i' \cdot \sin \alpha_i''}{\sum p_i' \cdot \sin \alpha_i' + \sum y_e \cdot \omega_i \cdot l_i \cdot \cos(\beta_i - \alpha_i) \cdot 1 \text{ м}},$$

где p_i' – вес отсека с учетом гидростатического взвешивания, МН, $p_i' = (p_i - \gamma_b \cdot \omega_i \cdot 1 \text{ м})$; p_i – вес отсека без учета гидростатического взвешивания, МН; γ_b – удельный (объемный) вес воды, равный 0,01 МН/м³; ω_i – площадь сечения обводненной части отсека, м²; I_i – гидравлический градиент в пределах отсека; α_i – угол наклона подошвы отсека, град (величина α_i при ук-

лоне подошвы отсека в сторону падения уступа принимается положительной, при обратном уклоне – отрицательной); β_i – угол наклона равнодействующей фильтрационного давления, град (величины β_i при направлении фильтрационного потока в сторону падения уступа принимаются положительными, при обратном направлении потока – отрицательными).

Склон или его элемент (откос, уступ и др.) считается устойчивым, если коэффициент его устойчивости $K_y > 1$.

Расчетный комплекс PLAXIS представляет собой пакет прикладных вычислительных программ для конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния системы основание – фундамент – сооружение [5]. Он позволяет моделировать грунты, применяя апробированные в современных геотехнических расчетах модели. В данной ситуации применялась модель Кулона–Мора – приближение первого порядка по отношению к реальному поведению грунта. Это упругопластическая модель, требующая следующие входные параметры:

- модуль Юнга E ;
- коэффициент Пуассона ν ;
- сцепление c ;
- угол внутреннего трения φ ;
- угол дилатансии ψ : глины не увеличивают свой объем при сдвиге $\psi = 0$, у песков $\psi = 0$ для $\varphi < 30^\circ$; $\psi = -30^\circ$ для $\varphi > 30^\circ$.

При оценке общей устойчивости склона пользуются коэффициентом общей устойчивости, который может определяться как отношение фактической прочности грунта на сдвиг к прочности на сдвиг в предельном состоянии. Если в качестве условия предельного равновесия принято условие прочности Кулона–Мора, то коэффициент общей устойчивости определяется выражением

$$\zeta = \frac{c + \sigma n \cdot \operatorname{tg} \varphi}{cr + \sigma n \cdot \operatorname{tg} \varphi r},$$

где c и φ – прочностные характеристики грунтов в основании; σn – фактическое нормальное напряжение; cr и φr – значения прочностных характеристик грунтов в предельном состоянии.

Для оценки общей устойчивости в ПК PLAXIS реализован метод *Phi-c-reduction* (снижение φ , c), при котором выполняется пропорциональное снижение прочностных характеристик до тех пор, пока не произойдет разрушение. Устойчивость при этом определяется коэффициентом $\sum Msf$:

$$\sum Msf = \frac{c}{cr} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_r}.$$

Деформированные расчетные конечно-элементные схемы склоновых участков представлены на рис. 2.

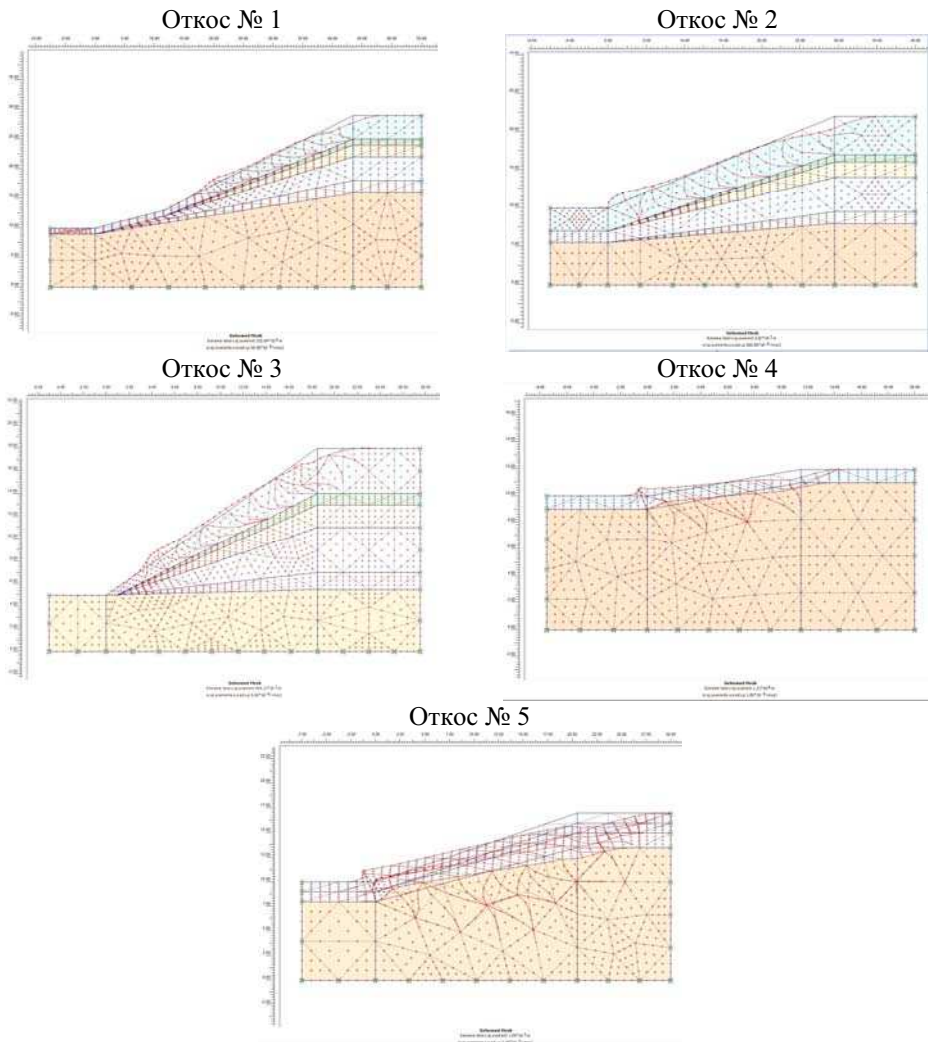


Рис. 2. Деформированные расчетные конечно-элементные схемы склоновых участков

Результаты расчетов устойчивости склонов, выполненных по методике «Рекомендаций по количественной оценке устойчивости оползневых склонов» и в ПК PLAXIS, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сопоставление результатов расчета

Номер склонового участка	Коэффициент устойчивости		Сходимость		
	Аналитический расчет	Расчет в ПК «PLAXIS»	Среднее значение	Средне-квадратическое отклонение	Коэф. вариации, %
1	1,44	1,20	1,32	0,12	9,1
2	1,64	1,34	1,49	0,15	10,1
3	0,95	0,99	0,97	0,02	2,1
4	4,75	5,52	5,135	0,385	7,5
5	2,52	2,24	2,38	0,14	5,9

Целями данного исследования являлись расчет устойчивости склонов долины реки Егошихи и определение необходимости укрепления оползнеопасных участков.

В ходе исследования были изучены инженерно-геологические, геоморфологические условия долины реки Егошихи, составлены геологические разрезы выбранных склоновых участков, проведены расчеты устойчивости двумя наиболее часто применяемыми в современной практике методами. Метод круглоцилиндрических поверхностей является оптимальным по трудоемкости и точности, в сравнении с другими аналитическими или графоаналитическими методами. Расчет в программном комплексе PLAXIS основан на хорошо изученном и широко распространенном методе конечных элементов, что дает надежные результаты.

Анализ выполненных расчетов (см. табл. 2), позволяет сделать следующие выводы:

- 1) сходимость результатов (коэффициент вариации менее 10 %);
- 2) склоновой участок № 3 является неустойчивым;
- 3) требуется укрепление склонового участка № 3.

В дальнейшем планируется провести расчеты устойчивости склонового участка № 3 в совместной работе с различными удерживающими конструкциями, составить сметы по укруп-

ненным показателям, сравнить результаты и дать рекомендации по выбору оптимального варианта укрепления в условиях города Перми.

Библиографический список

1. Федоровых Я.А., Максимова С.В. Проект преобразования долины реки Егошихи в контексте идей Мастер-плана города Перми // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Урбанистика. – 2011. – № 3. – С. 17–24.
2. Федоровых Я.А., Завьялова Д.Ю., Максимова С.В. Преобразование территории долины р. Егошихи в г. Перми // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 122–126.
3. Рычагов Г.И. Общая геоморфология. – М.: Изд-во Моск. ун-та: Наука, 2006. – 416 с.
4. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 80 с.
5. PLAXIS [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – URL: <http://plaxis.ru> (дата обращения: 14.06.2012).

References

1. Fedorovykh Ja.A., Maksimova S.V. Proekt preobrazovaniya doliny reki Egoshikha v kontekste idej Master-plana goroda Permi [The transformation project of the Egoshikha's river valley in the context of the Perm Strategic Masterplan]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2011, no. 3, pp. 17–24.
2. Fedorovykh Ja.A., Zav'jalova D. Ju., Maksimova S.V. Preobrazovanie territorii doliny r. Egoshikha v g. Permi [The transformation project of the Egoshikha's river valley in Perm]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroi-tel'stvo i arkhitektura*, 2011, no. 1, pp. 122–126.
3. Rychagov G.I. Obschaja geomorfologija [The total geomorphology]. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, Nauka, 2006. 416 p.
4. Rekomendacii po kolichestvennoj ocenke ustojchivosti opolznevyyh sklonov. PNIIS. M.: Strojizdat, 1984. 80 p.

5. Uchebnoe posobie «Plaxis», available at: <http://plaxis.ru> (accessed 14 June 2012).

Получено 12.02.2013

J. Sushkova, A. Ponomarev

STABILITY ANALYSIS OF SLOPING LANDS OF THE VALLEY EGOSHIKHA RIVER IN PERM

Shows the relevance and need for careful analysis of the dangerous situation in the valley Egoshikha river and choice means to strengthen critical areas of slopes due to the direction of the project and the objectives of the investor. Were analyzed geomorphological features of the site, the results of geological surveys and topographic features. Have been allocated five sloping sites and for each of them were calculated by two independent methods: calculation according to the «Guidelines for the quantitative estimation of the stability of sliding slopes», as well as in the calculated complex PLAXIS using the finite element analysis of the stress-strain state of the base – foundation – building. Was analyzed by the convergence of the results of calculations by various methods and the coefficients slope stability, defined landslide area and draw conclusions on the need to strengthen it.

Keywords: slope, stability, stability factor, soils.

Сушкова Яна Александровна (Пермь, Россия) – магистрант гр. ПГС-11-1мо, кафедра «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

Пономарев Андрей Будимирович (Пермь, Россия) – д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительное производство и геотехника», советник РААСН, действительный член Академии естественных наук РФ (РАЕН), почетный строитель РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: spstf@pstu.ac.ru).

Sushkova Yana (Perm, Russia) – graduate student, Department of Construction production and geotechnics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomol av., 29. e-mail: yasja.fed@gmail.com).

Ponomarev Andrey (Perm, Russia) – Doctor of Technics, Professor of department of Construction production and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomol av., 29, e-mail: spstf@pstu.ac.ru).