

ПРИРОДА КРУПНЫХ ОПОЛЗНЕЙ МОСКВЫ И ПОДМОСКОВЬЯ

THE NATURE OF LARGE LANDSLIDES IN MOSCOW AND ITS VICINITIES

КРОПОТКИН М.П.

Директор ООО «НПП «Сингеос»», г. Москва,
singeos@narod.ru

KROPOTKIN M.P.

Director of the «Singeos» LLC research and production enterprise,
Moscow, singeos@narod.ru

Ключевые слова:

оползни выдавливания; компьютерное моделирование; поэтапные расчеты; поровое давление; ползучесть.

Key words:

extrusion landslides; computer simulation; stage-by-stage calculations; pore pressure; plastic flow.

Аннотация

В статье рассмотрена природа крупных блоковых оползней Москвы и Подмосковья, смещение которых связано с верхнеюрскими глинами. С помощью поэтапного компьютерного моделирования показано, что развитие подобных оползней происходит на основе классического сдвигового механизма, а не выдавливания, как традиционно считают многие исследователи. Изменения напряженно-деформированного состояния массива грунта при подмыве его рекой и постепенном перемещении языковой части оползня обуславливают снижение вертикальных напряжений в оползших ранее отложениях, обеспечивающее переход фазы глубокой ползучести в прогрессирующую стадию.

Введение

Оползневые процессы чрезвычайно разнообразны. Существует большое количество их классификаций, используемых для обоснования методов прогноза и разработки защитных мероприятий.

В большинстве отечественных классификаций среди прочих типов выделяются оползни выдавливания (раздавливания, сжатия) с особыми механизмами формирования и развития, которые, по мнению автора, необоснованно распространяются на широкий круг оползневых процессов.

Автором было выполнено поэтапное компьютерное моделирование развития некоторых крупных блоковых оползней Москвы и Подмосковья, смещение которых связано с верхнеюрскими глинами. Оползни этого типа до сих пор обычно относили к оползням выдавливания.

Использованные при моделировании программные средства

Для расчетов был использован блок программного комплекса PSK (разработчики — П.В. Корбутяк, М.П. Кропоткин, ООО «НПП «Сингеос»»). В его основе лежит математическая модель в виде системы уравнений предельного равновесия, отражающих соотношение сдвигающих и удерживающих сил в грунтовом массиве в двухмерной постановке с учетом сил взаимодействия по границам расчетных отсеков и соответствующих напряженному состоянию массива непосредственно перед началом смещения оползня. При этом учитываются все основные силы, действующие на блок грунта, и направления их приложения.

Специальная подпрограмма методом интерполяции выполняет расчет высотного положения дневной поверхности, границ слоев, уровня грунтовых вод (УГВ) и пьезометрических уровней в каждом вертикальном сечении, являющемся границей между блоками при заданном шаге разбиения.

По определенному алгоритму осуществляется автоматизированный поиск реальной или потенциальной

Abstract

The article discusses the nature of large block landslides of Moscow and its vicinities, the displacements of which are associated with Upper Jurassic clays. Using stage-by-stage computer simulation, the author shows that development of such landslides is based on the classic shear mechanism, but not on the basis of extrusion as many researchers traditionally consider. Changes of the stress-strain state of a soil mass due to underscouring it by a river and gradual displacement of the landslide tongue cause decrease of vertical stresses in the earlier slid deposits that provides transition of the deep plastic flow phase into the progressive stage.

поверхности смещения оползня, определяется поверхность с минимальным коэффициентом устойчивости. Алгоритм поиска позволяет анализировать положение плоскости скольжения *любой формы* без ограничений по количеству точек перегиба. Программа производит автоматическое разбиение модели склона на блоки заданного размера. Разбиение регулируется по высоте и по горизонтали в широких пределах.

Коэффициент устойчивости на каждом шаге поиска рассчитывается итерационным методом путем решения системы уравнений равновесия горизонтальных и вертикальных сил для блоков плоской модели склона. Предусматривается возможность учета давления напорных подземных вод, давления фильтрационного потока, воздействия различных пригрузок, сейсмических (в том числе взрывных) ускорений. Также предусматривается возможность задания по отдельным направлениям свойств грунтов, отличных от свойств по данному слою в целом. Кроме коэффициента устойчивости и положения поверхности смещения рассчитывается усилие взаимодействия (сжатия, растяжения) по границам условных блоков.

По поводу учета так называемого гидродинамического давления хотелось бы отметить, что этот термин не очень удачен. Никакого динамического воздействия движущегося потока в грунтах в подавляющем большинстве случаев нет, так как скорость этого потока очень мала, а в глинистых грунтах просто ничтожна (за исключением оползней гидродинамического разрушения, особенно так называемых суффозионных оползней). Тем не менее определенное влияние уклона поверхности грунтового потока существует. В большинстве случаев оно по своей природе относится к группе гидростатических воздействий, но направленных не вертикально, а по направлению потока, то есть перпендикулярно к линиям равных УГВ. Это влияние имеет две составляющие:

- воздействие различий в массах соседних расчетных блоков (при наклонном положении уровня грунтовых вод в них различна доля более тяжелой водонасыщенной части, что учитывается в ряде компьютерных программ для расчетов устойчивости, не использующих так называемый принцип взвешивания);
- силовое воздействие фильтрационного потока, вычисляемое по формуле, предложенной авторами комплекса PSK:

$$T_{\phi} = \sum_{k=1}^s \gamma h_k I \Delta h_k n_k \cos \beta_k, \quad (1)$$

где γ — удельный вес грунтовой воды; s — количество литологических слоев в блоке; k — номер слоя; h_k — мощность фильтрационного потока в k -м слое; I — ширина блока; Δh_k — потеря напора в k -м слое в пределах блока; n_k — эффективная пористость k -го слоя; β_k — угол направления фильтрационного потока к горизонтальной плоскости, принимаемый средним между углами наклона пьезометрической поверхности и поверхности водоупора.

Программный комплекс PSK (со второй половины 1990-х годов включивший разработанные его авторами программы трехмерных и вероятностных расчетов

устойчивости склонов) позволяет существенно повысить точность оценки устойчивости склона в сравнении с традиционными инженерными методами расчета за счет:

- более точного учета возникающих в массиве склона внутренних напряжений;
- поиска и определения наиболее опасной поверхности потенциального смещения (ППС);
- эффекта «сглаживания» ППС (поскольку, как правило, используется несколько десятков расчетных блоков).

В результате значения коэффициента устойчивости K_u , получаемые с использованием традиционных методов по поверхности, задаваемой специалистами интуитивно, как правило, оказываются на 3–35% выше величин K_u , определяемых с помощью программного комплекса PSK. Для поверхностей, близких к круглоцилиндрическим, различия минимальны, а для сложнопостроенных склонов с иной формой ППС они максимальны.

Автором неоднократно проводилось сопоставление итогов расчетов устойчивости в программном комплексе PSK с результатами, полученными традиционными методами (при предварительно найденном с помощью программ PSK положении опаснейшей поверхности потенциального смещения). Например, в 1998 году было выполнено сопоставление результатов расчетов для оползневых волжских склонов у Саратовского нефтеперерабатывающего завода. Средние значения K_u , полученные методами Терцаги, Маслова — Берера и Шахунянца (над чертой) и в программах PSK (под чертой) составили: 1,29/1,25; 1,13/1,01; 1,17/1,25; 0,95/1,00; 1,25/1,25. Сопоставление, выполненное в 2015 г. для склона у Нижегородского Кремля, дало следующие значения коэффициента устойчивости: 0,97 — в комплексе PSK; 0,89 — по методу Бишопа; 1,06 — по методу Morgenштерна — Прайса; 0,97 — по методу Ямбу (0,97 — среднее из трех последних). Различия в величинах K_u обусловлены, в частности, неучетом в ряде традиционных методов нормальной к поверхности смещения составляющей напряжений, передаваемых на расчетный блок от прилегающих частей оползневого тела.

Параметры модели

При компьютерном моделировании, обсуждаемом в данной статье, автор рассматривал условия возникновения и развития крупных блоковых оползней г. Москвы и Подмосковья, образующихся при деформировании толщи верхнеюрских глинистых грунтов. Расчеты устойчивости выполнялись для нескольких сменяющих друг друга условных этапов развития склона, на которых последовательно менялись морфометрия и геологический разрез склона, а также характеристики грунтов. Исходные параметры модели (рельеф склона, схематизированное геологическое строение массива, положение УГВ, физико-механические свойства грунтов) задавались на основе осредненных данных ООО «НПП «Сингеос» и ряда других организаций по 15 оползневым участкам (9 — в музее-заповеднике «Коломенское», 4 — на Воробьевых горах; 1 — у Камашевской набережной; 1 — в районе Фили).

Данный способ исследования был выбран по двум причинам:

- любое моделирование как минимум предполагает определенные генерализацию и схематизацию моделируемого объекта; при исследовании не конкретного объекта, а их разновидности логично и модель разрабатывать и исследовать для разновидности в целом;
- данный подход исключает сомнения, связанные с возможным выбором одного или нескольких конкретных объектов, наиболее удачно подтверждающих ту или иную гипотезу автора.

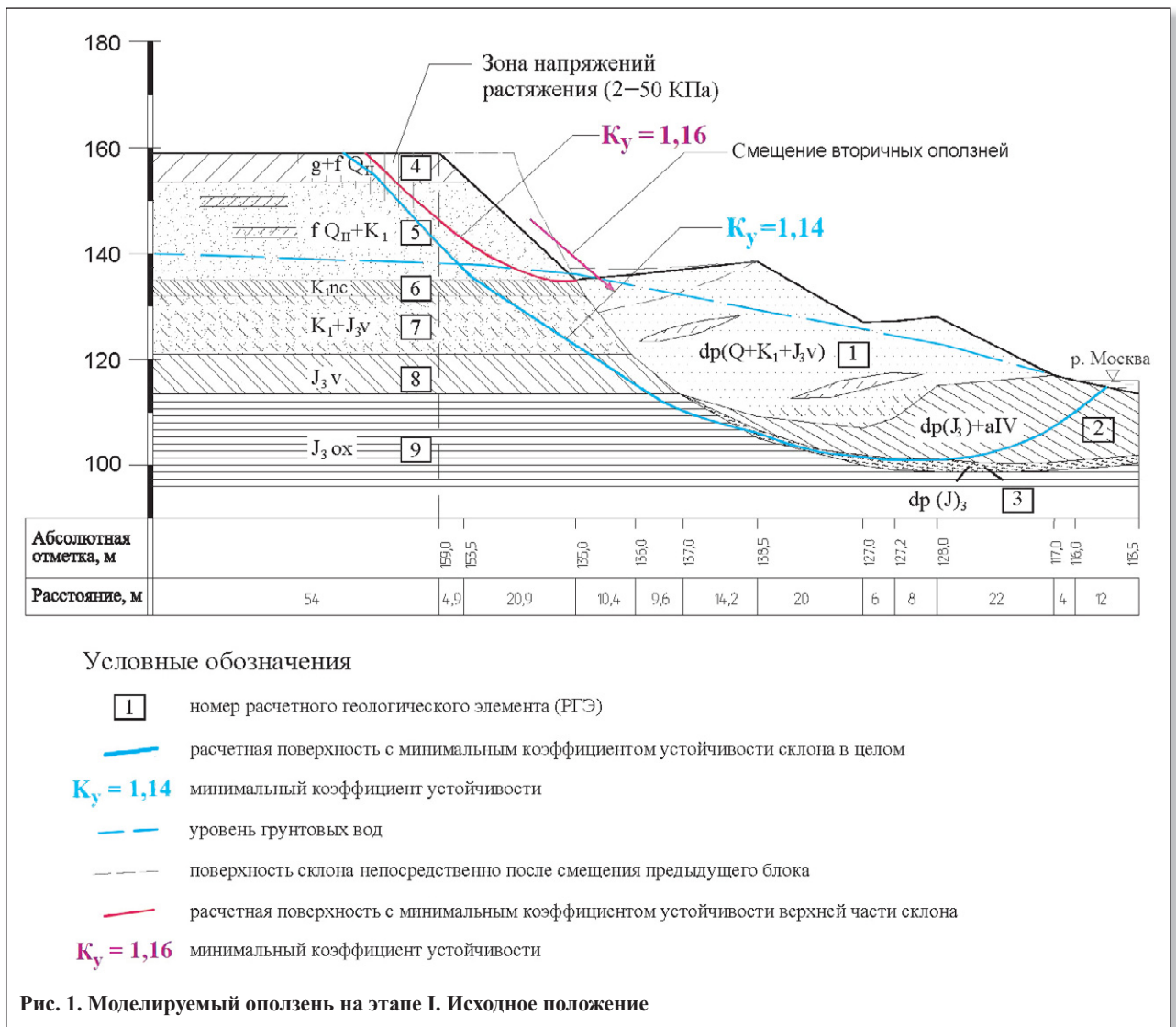
Протяженность моделируемого склона от бровки до уреза воды в реке была принята на основе рассчитанной вышеуказанным способом средней высоты склона в соответствии с формулами и графиками [10, 17, 18], составленными в результате обобщения большого массива фактических данных по подобным оползням. При принятой высоте склона 43 м минимальное расстояние от бровки до уреза воды составило 120 м на этапе моделирования I (рис. 1) и 116 м на этапе II (рис. 2).

Все использованные в расчетах характеристики грунтов задавались на основе их *нормативных* значений в соответствии с их реально преобладающими литологическими типами, консистенцией и т.д. Схематизированная модель включала 9 расчетных геологических

элементов (РГЭ). Их расположение в разрезе и характеристики представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Для четвертичных и нижнемеловых грунтов использовались осредненные параметры по 15–20 участкам, изыскания по которым в половине случаев выполнялись с участием автора. Вторую половину источников данных представляют отчеты по изысканиям иных организаций на вышеуказанных оползневых участках.

Для верхнеюрских грунтов за основу были взяты данные О.И. Игнатовой [12], обобщившей результаты изысканий по всей территории Москвы, с небольшой корректировкой (с учетом характеристик, полученных для еще ненарушенных частей склонов на рассматриваемых оползневых склонах). При значительных отличиях вертикальных напряжений на участках расположения поверхности смещения в грунтах J_3 по сравнению с их средними значениями при лабораторных испытаниях по материалам О.И. Игнатовой вводилась поправка на некоторое выполаживание кривой « $\tau - \sigma$ » (где τ — сдвигающее напряжение; σ — вертикальное напряжение), с ростом вертикальных напряжений приводящее к уменьшению угла внутреннего трения при некотором увеличении удельного сцепления. Например, для РГЭ-8 на этапе II (см. рис. 2) средние значения вертикальных напряжений от собственного веса пород в зоне поверхности смещения в пре-



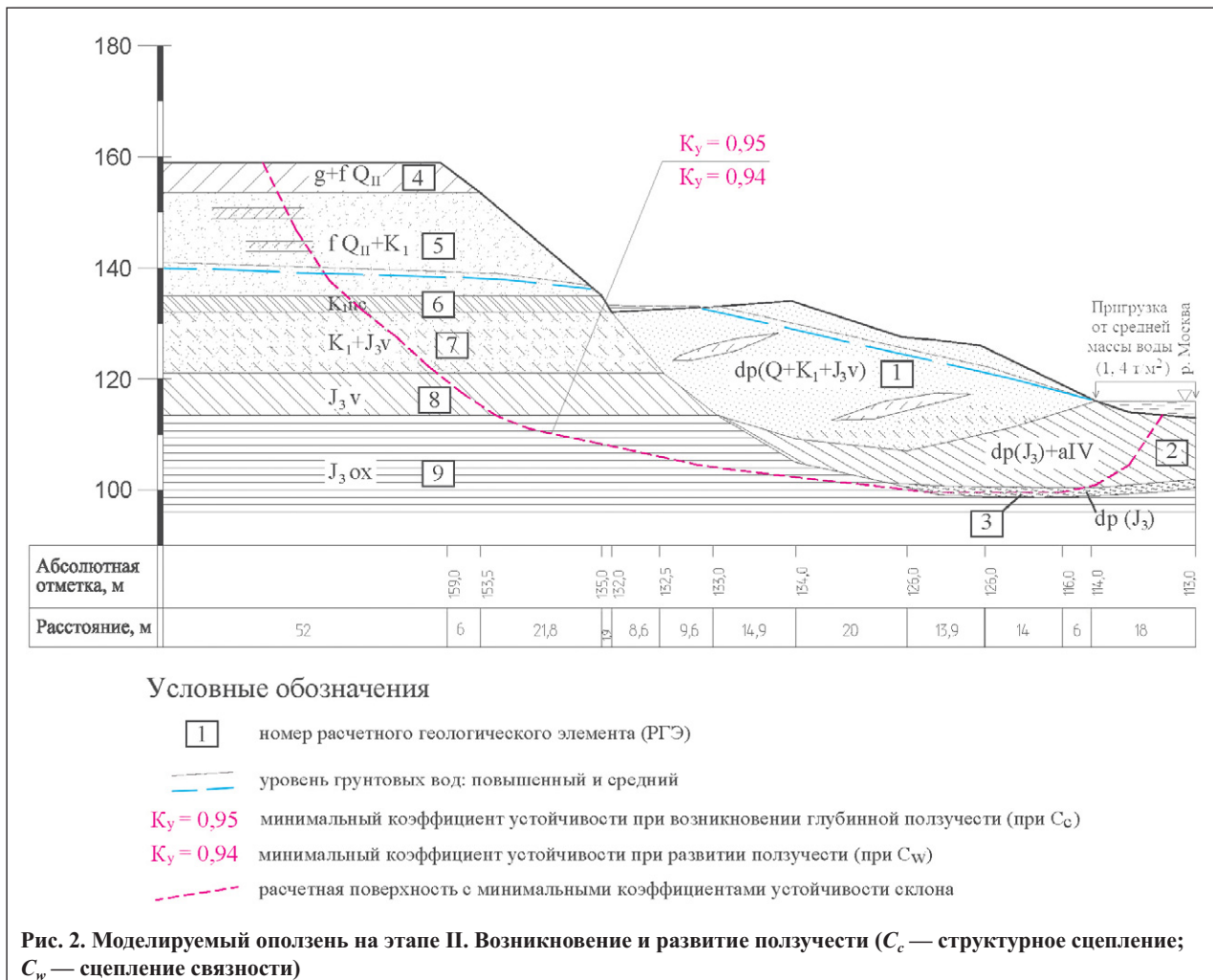
| № слоя (РГЭ) | Угол внутр. трения, град. | | | Уд. сцепление, тс/м ² | | Плотность, т/м ³ | | | Эффективная пористость, д. ед. |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------------|
| | выше УГВ | в водонас. сост. | | выше УГВ | в водонас. сост. | выше УГВ | в водонас. сост. | с учетом эффекта взвешив. | |
| | | без учета поров. давл. | с учетом поров. давл. | | | | | | |
| 1 | 20 | 18 | 15 | 1,0 | 1,0 | 1,80 | 1,93 | 0,95 | 0,20 |
| 2* | - | 10 | 8 | - | 4,0 | - | 1,70 | 0,76 | 0,04 |
| 3 | - | - | 7/8** | - | 3,1 | - | 1,74 | - | 0,03 |
| 4 | 19 | - | - | 4,3 | - | 2,10 | - | - | 0,08 |
| 5 | 31 | 30 | 30 | 0,8 | 0,7 | 1,86 | 2,02 | 1,02 | 0,20 |
| 6 | - | 20 | 19 | - | 4,8 | - | 1,92 | - | 0,05 |
| 7 | - | 29 | 20 | - | 0,9 | - | 1,98 | 1,01 | 0,20 |
| 8 | - | 19 | 10 | 5,0 | 4,0 | - | 1,90 | - | 0,04 |
| 9 | - | 16 | 8 | - | 7,5 | - | 1,75 | - | 0,02 |

* Характеристики РГЭ-2 приведены в таблице для его «языковой» части. В остальной его части плотность принята равной 1,73 т/м³.
 ** Над чертой — для горизонтальной зоны предыдущих смещений; под чертой — для остальной части РГЭ-3.

делах этого слоя равны 0,7–0,8 МПа, а в материалах О.Н. Игнатовой вертикальные напряжения в среднем составляют 0,30–0,35 МПа.

Для преимущественно песчаной толщи РГЭ-5 (fII-K_{1a}) значения прочности должны учитывать наличие в ней прослоев супесей и суглинков и преимущественно мелкий и пылеватый состав песков K₁. Это

же относится и к преимущественно песчаной толще РГЭ-7 (K_{1nc}-J_{3v}). Имеющиеся в ней сравнительно маломощные прослои трещиноватых сильновыветрелых песчаников в реальности не способны играть в массиве существенную роль. Они легко отчленяются по субвертикальным трещинам от основного слоя и смещаются в толще оползающих грунтов.



Необходимо отметить, что данные О.И. Игнатовой по прочности верхнеюрских грунтов включают результаты лишь консолидированно-дренированных испытаний. Преобладают результаты подобных испытаний и в доступных материалах по свойствам нижнемеловых грунтов, в том числе в данных Е.С. Проворовой [24]. Для обильно обводненных массивов их, естественно, нельзя использовать непосредственно. Отдельные данные по неконсолидированно-недренированным испытаниям без фиксации порового давления в ходе опыта относительно пригодны лишь для узкого круга расчетов устойчивости (например, для быстро возводимых насыпей).

Так как в программах серии PSK не предусмотрен непосредственный ввод величин порового давления, для их учета в слоях, расположенных ниже УГВ, был вычислен эффективный угол внутреннего трения $\varphi_{эф}$:

$$\operatorname{tg} \varphi_{эф} \cdot \sigma_{\text{tot}} = \operatorname{tg} \varphi \cdot (\sigma_{\text{tot}} - H), \quad (2)$$

где σ_{tot} — тотальное напряжение от веса водонасыщенных и неводонасыщенных грунтов в точке поверхности смещения (ПС), расположенной посередине участка ПС в оцениваемом слое (РГЭ); H — напор в данной точке.

Значения порового давления в суглинках и глинах J_3v могут быть достаточно точно установлены по величинам напоров (практически до УГВ) в частых прослоях песка по данным ряда скважин. При этом для всех РГЭ, для которых используется параметр $\varphi_{эф}$, из расчетов должен быть исключен учет эффекта «взвешивания».

При расчетах $\varphi_{эф}$ для исходных значений угла внутреннего трения учитывалось некоторое «выполаживание» кривой « τ — σ » с ростом вертикальных напряжений.

Материалы по этому вопросу достаточно скудны. На их основе можно утверждать, что для верхнеюрских глин при $\sigma = 1,0$ МПа в условиях консолидированно-дренированных испытаний угол внутреннего трения φ падает до 11 – 12° при возрастании кажущегося удельного сцепления до 100 – 130 КПа, а при $\sigma = 1,3$ – $1,6$ МПа значение φ примерно равно 9° при сцеплении 160 – 220 КПа. При вертикальных напряжениях в несколько мегапаскалей угол внутреннего трения снижается до 2 – 7° при увеличении кажущегося сцепления до нескольких сотен килопаскалей [11, 20, 26, и др.¹].

Нарушение структуры грунта в зоне смещений в языковой части оползня резко увеличивает способность верхнеюрских глин к набуханию. При этом давления набухания возрастают с 3 – 6 до 4 – 9 кгс/см² и более, создавая возможность соответствующего разупрочнения. Так, глины келловея-оксфорда полутвердой и тугопластичной консистенции залегающие в районах ММДЦ «Москва-Сити» и Капотни на глуби-

нах 7 – 20 м от дневной поверхности, разуплотнены (их коэффициент пористости e составляет $1,3$ – $1,4$) и при меньшем в $1,2$ – $1,8$ раза сцеплении имеют углы внутреннего трения 13 – 14° [7] — на несколько градусов ниже значений по материалам О.И. Игнатовой. Подобное уменьшение исходных углов внутреннего трения было учтено в расчете $\varphi_{эф}$ для РГЭ-2 в языковой части оползня.

Для оползневых глинистых отложений вблизи зоны смещения в районе фуникулера на Воробьевых горах в ходе изысканий с участием автора были получены следующие нормативные прочностные характеристики: угол внутреннего трения $\varphi_n = 6,4^\circ$; удельное сцепление $C_n = 31$ КПа. Для этого участка также выполнялись обратные расчеты устойчивости склона в целом, учитывая ситуацию, реконструированную для периода до 1950-х годов, в результате чего был получен эффективный угол внутреннего трения $5,5^\circ$ при сцеплении 29 КПа².

По обобщенным данным зарубежных исследователей [3] для глин, аналогичных глинам J_3ox , секущий (принятый при фиктивном условии $C = 0$) остаточный угол внутреннего трения $\varphi_{ост}$ составляет: $12,5^\circ$ при нагрузке $0,4$ МПа; $10,5^\circ$ при нагрузке $0,7$ МПа. Принимая мощность уже оползшей ранее толщи (см. рис. 1) равной 25 м, а ее среднюю плотность равной $1,8$ т/м³, получим нагрузку $0,45$ МПа, чему соответствует секущий $\varphi_{ост} = 12,2^\circ$. Отсюда при определенном сцеплении $0,031$ МПа получим: $\operatorname{tg} \varphi_{ост} = [0,45 \cdot \operatorname{tg} 12,2^\circ - 0,031] / 0,45$, откуда $\varphi_{ост} = 8,3^\circ$.

По данным М.Н. Гольдштейна и А.Я. Туровской [23], для большого количества оползневых зон смещения в глинах остаточный угол внутреннего трения составляет 8° . Повторные дренированные испытания глин J_3ox на сдвиг, выполненные Государственным специализированным проектным институтом (ГСПИ) на одном из участков музея-заповедника «Коломенское» в 2003 году, дали следующие нормативные значения: $\varphi_n = 11^\circ$, $C_n = 30$ КПа. С учетом порового давления, принятого равным напору подземных вод над зоной поверхности смещения в глинах J_3ox , получим для этого участка: $\varphi_{эф} = 6,2^\circ$, $C = 30$ КПа. Для оползневого участка в московском районе Сабурово были установлены [13] еще более низкие характеристики: $\varphi_{ост} = 5^\circ$; $C_{ост} = 23$ КПа. Эффективный угол внутреннего трения верхнеюрских глин, определенный Е.П. Емельяновой, составил 5° [10].

Таким образом, значения остаточного эффективного угла внутреннего трения около 6° следует, видимо, признать наиболее достоверными для субгоризонтальной зоны, «разработанной» предыдущими смещениями. Для остальной части РГЭ-3 следует принять величину $\varphi = 7,5^\circ$ (оба эти значения приведены уже с учетом поровых давлений).

Принятые для этапа II реологические свойства верхнеюрских грунтов рассчитывались в соответ-

¹ По данным отчета о научно-исследовательской работе «Изучение инженерно-геологических условий и разработка рекомендаций по оптимизации параметров отвалов ООО «Воскресенские минеральные удобрения», выполненного в 2011 году научным центром геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского государственного горного института.

² По данным технического отчета «Оценка устойчивости оползневого склона в районе размещения многофункционального кресельного подъемника на ООПТ «Воробьевы горы», выполненного ООО «НПП «Сингеос» в 2003 году.

ствии с подходом Н.Н. Маслова [19], рекомендациями Дорожного научно-исследовательского института «СоюзДорНИИ» [14], Ю.С. Гребнева [8], данными С.С. Вялова [5], Ф.В. Котлова [15], М.Н. Парецкой [22], Л.А. Аносовой [1], М.А. Ивочкиной (Лычевой) [11], А.М. Гальперина, В.И. Стрельцова [6], Л.А. Аносовой, Р.С. Зиангирова, Т.И. Робустовой [2].

Для других разностей глинистых грунтов в водонасыщенном состоянии на основе тех же источников были приняты следующие значения: $C_c = 36$ кПа, $C_w = 12$ кПа для меловых отложений; $C_c = 24$ кПа, $C_w = 16$ кПа для отложений волжского яруса юры.

Результаты моделирования

В излагаемом материале под термином «этап» понимаются условные фазы оползневой процесса различной продолжительности, контролируемые рядом изменяющихся факторов — скоростью размыва оползневой языки рекой, колебаниями уровня грунтовых вод, смещением (положением) уже отчлененных от массива блоков. Отметим, что все приводимые далее коэффициенты устойчивости были получены с использованием методики учета гидродинамических сил, дающей существенно меньшие значения этих сил, чем при использовании большинства методов расчета устойчивости.

На *этане I* рассматривается исходное положение оползня, при котором предыдущий сместившийся и нарушенный оползневый блок занимает сравнительно высокое положение, а выдвинувшийся в реку язык частично размывает его. Крутизна склона в верхней части соответствует его предполагаемой крутизне после завершения периода активных деформаций — отчленения и смещения очередного оползневой блока. Смещение вторичных оползней, формирующихся в крутой части стенки срыва, приводит к ее выполаживанию и частичному заполнению оползневой западины основного блока. Склон в целом имеет коэффициент устойчивости 1,14 (см. рис. 1). При этом в определенной зоне за бровкой склона формируются значительные растягивающие напряжения.

Специальная серия расчетов этих напряжений в зависимости от шага разбиения на вертикальные блоки выявила их весьма малые изменения. В верхней 5–6-метровой зоне удельные напряжения растяжения при шаге, стремящемся к нулю, составили 25–35 кПа, снижаясь с глубиной.

Границы зоны растягивающих напряжений также слабо зависят от шага разбиения, то есть достаточно объективны. Глубина зоны их развития составляет 9,0–9,5 м.

Эти напряжения приводят к образованию трещины глубиной до 8–9 м, разрывающей суглинки РГЭ-4 и верхнюю часть преимущественно песчаной толщи РГЭ-5. Подобные трещины фиксировались, в частности, в районе Фили-Кунцево [9].

На *этане II* рассматривается возможность основного смещения следующего оползневой цикла. Ширина новой оползневой ступени, как и общая протяженность оползневой склона от новой стенки срыва до уреза реки, соответствует обобщенным по обширному материалу данным В.В. Кюнцеля [17, 18]. Свойства глинистых грунтов, залегающих ниже УГВ, рассчитаны с учетом поровых давлений (табл. 2). Учтено дальнейшее перемещение оползневой массива вниз и вдоль поверхности смещения с размывом его языковой части рекой, а также продолжение выполаживания основной стенки срыва.

Первоначально исследуется возможность возникновения деформаций ползучести на всю высоту склонового массива с захватом верхнеюрских грунтов. Логично предположить, что преодоление структурного сцепления C_c происходит в периоды повышенной обводненности массива, в связи с чем положение уровня грунтовых вод за бровкой для этих расчетов принимается на 1,0–1,5 м выше среднего, а на стадии развития ползучести вновь принимается среднее положение УГВ.

Мы видим, что в глинистых грунтах юры и мела сдвиговые напряжения уверенно преодолевают как структурное сцепление (обеспечивая возможность *возникновения ползучести*), так и сцепление связности (по терминологии физико-технической теории ползучести Н.Н. Маслова), обеспечивая *развитие ползучести*.

Таблица 2

| Модельные параметры грунтов на этапе II (возникновение и развитие глубинной ползучести) | | | | | | | | |
|---|---------------------------|------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------------|
| № слоя | Угол внутр. трения, град. | | Уд. сцепление, тс/м ² | | Плотность, т/м ³ | | | Эффективная пористость, д. ед. |
| | выше УГВ | в водонас. сост. | выше УГВ | в водонас. сост.*** | выше УГВ | в водонас. сост. | с учетом эффекта взвешив. | |
| 1 | 20 | 15,0 | 1,0 | 0,8/0,2 | 1,80 | 1,93 | 0,95 | 0,20 |
| 2* | - | 10,0 | - | 3,2/0,8 | - | 1,70 | 0,76 | 0,04 |
| 3 | - | 6,0/7,5** | - | 3,1 | - | 1,74 | - | 0,03 |
| 4 | 19 | - | 4,3 | - | 2,10 | - | - | 0,08 |
| 5 | 31 | 30,0 | 0,7 | 0,6 | 1,86 | - | 1,02 | 0,20 |
| 6 | - | 18,5 | - | 3,6/1,2 | - | 1,92 | - | 0,05 |
| 7 | - | 29,0 | - | 0,8 | - | - | 0,01 | 0,20 |
| 8 | - | 12,0 | - | 3,0/2,0 | - | 1,90 | - | 0,04 |
| 9 | - | 7,4 | - | 4,4/4,2 | - | 1,75 | - | 0,02 |

* Характеристики РГЭ-2 приведены в таблице для его «языковой» части. В остальной его части плотность принята равной 1,73 т/м³.

** Над чертой — для горизонтальной зоны предыдущих смещений; под чертой — для остальной части РГЭ-3.

*** Над чертой — структурное сцепление C_c ; под чертой — сцепление связности C_w .

сти. Коэффициенты устойчивости при этом составляют 0,95 и 0,94 соответственно (см. рис. 2).

На стадии основного смещения в массиве появляется вторая, более удаленная от бровки, зона разрушения. Выполненное еще в конце 1960-х годов моделирование подобного склона с использованием эквивалентных материалов также показало наличие двух зон трещин — вблизи бровки и примерно в 30 м (в пересчете на натурные условия) от нее [9].

Однако основное смещение готовится в зоне, в которой, по данным компьютерного моделирования, отсутствуют напряжения растяжения и, соответственно, трещины закола. При основном смещении эти трещины появляются уже в качестве верха стенки срывадвигающегося массива.

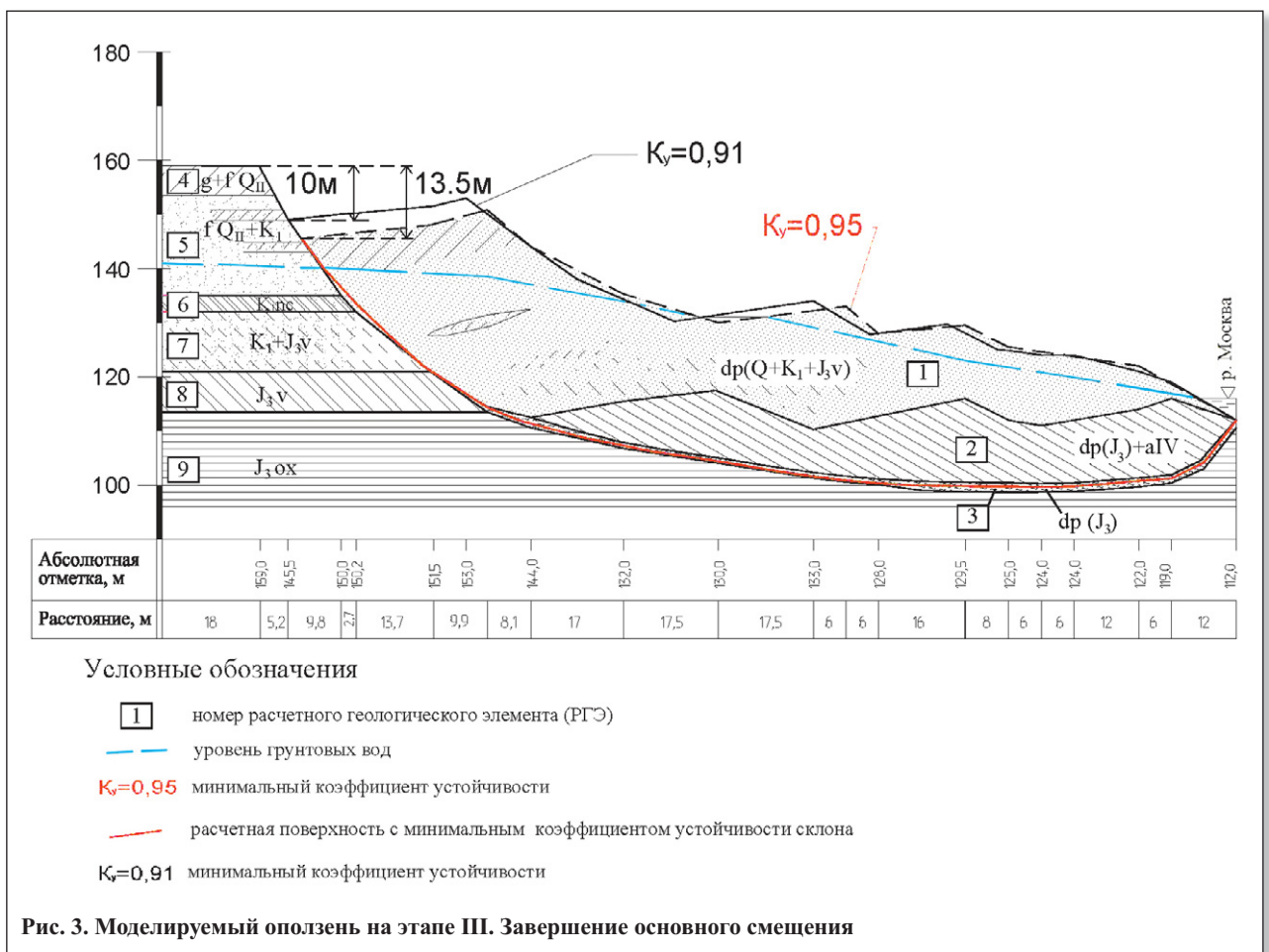
Отметим, что полученные в расчетах значения коэффициента устойчивости 0,94–0,95 показывают достоверность возникающих оползневых деформаций при решении задачи не только в плоской, но и в трехмерной постановке (в условиях реальных склоновых массивов). При этом образующаяся форма поверхности смещения в верхней части в грубом приближении близка к круглоцилиндрической. Таким образом, основное смещение подобных оползней происходит по классическому сдвиговому типу.

При дальнейшем переходе сдвиговых деформаций в стадию прогрессирующей ползучести происходит полное формирование поверхности смещения со снижением прочностных свойств по *всей* ее зоне. При этом в соответствии с рекомендациями И.О. Тихвинского [25] сцепление следовало бы уменьшить до ну-

ля. Однако автор ограничился его снижением до значения, среднего между нулем и остаточным сцеплением C_w при неизменности угла внутреннего трения. Для РГЭ-4 было принято значение остаточного удельного сцепления, равное 10 КПа (табл. 3). Полученный при этих параметрах коэффициент устойчивости 0,81 свидетельствует о достаточной энергетике начавшегося оползания.

Расчеты, выполненные для *этапа III*, преследовали цель определения рельефа и общего строения массива на момент достижения оползневой телом нового состояния равновесия. При этом смещения (частично наследуя поверхность смещения, образовавшуюся первоначально) развиваются в основном в толще уже нарушенного массива, формируя как субгоризонтальную зону сдвига, так и весьма крутые зоны с большими углами поворота слоев (рис. 3). Возникающее внутреннее строение склона частично соответствует разрезам, приводимым Г.П. Постоевым [23] (рис. 4), но при иной интерпретации их формирования.

При изысканиях с участием автора, в частности, на территории музея-заповедника «Коломенское» неоднократно фиксировались большие перекосы оползневых блоков (в одном случае — до их запрокидывания на отрицательные углы), что ясно указывало на их вращение. На оползневом участке в районе Фили-Кунцево обнажения верхнеюрских глин фиксировались на отметках 125–130 м при положении кровли этих грунтов в коренном залегании на отметках 115–117 м, что также говорит о значительных проворотах блоков при смещении.



| Модельные параметры грунтов на этапе III (завершение основного смещения) | | | | | | | |
|--|---------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|
| № слоя | Угол внутр. трения, град. | | Уд. сцепление, тс/м ² | | Плотность, т/м ³ | | Эффективная пористость, д. ед. |
| | выше УГВ | в водонас. сост. | выше УГВ | в водонас. сост. | выше УГВ | в водонас. сост. | |
| 1 | 20 | 15,0 | 1,0 | 0,2 | 1,80 | 1,93 | 0,20 |
| 2* | - | 10,0 | 4,0 | 0,4 | 1,70 | 1,70 | 0,04 |
| 3 | 6 | 6,4 | 4,0 | 1,6 | 1,74 | 1,74 | 0,03 |
| 4 | 19 | - | 4,3 | 1,0 | 2,10 | - | 0,08 |
| 5 | 31 | 30,0 | 0,7 | 0,5 | 1,86 | 2,02 | 0,20 |
| 6 | - | 18,0 | - | 0,7 | - | 1,92 | 0,05 |
| 7 | - | 23,6 | - | 0,4 | - | 1,98 | 0,20 |
| 8 | - | 12,3 | - | 1,0 | - | 1,90 | 0,04 |
| 9 | - | 8,0 | - | 2,1 | - | 1,75 | 0,02 |

* Характеристики РГЭ-2 приведены в таблице для его «языковой» части. В остальной его части плотность принята равной 1,73 т/м³.

Угол поворота при вращении верхних оползневых блоков как в природе, так и при моделировании методом эквивалентных материалов, как правило, не превышает 10°. У нижних блоков он больше [9], что закономерно, так как в этом случае частично складываются результаты 2–4 проворотов.

Формы зон смещения, аналогичные полученной автором в ходе компьютерного моделирования и не соответствующие механизму раздавливания, были установлены на оползневом участке вблизи правобережного Чертановского канализационного коллектора в Коломенском как по данным высокоточной скважинной инклинометрии (рис. 5) [4], так и геодезическими методами (рис. 6) [16]. Более того, продлив поверхность рельефа и предполагаемую поверхность смещения на рис. 5 до уреза р. Москвы, получим классическую форму ПС, близкую к круглоцилиндрической, предусматривающую смену знака вертикальных смещений в районе набережной. Это полностью подтверждается данными высокоточных наблюдений за осадками реперов, согласно которым их опускание в верхней части оползневого тела сменяется их поднятием у стенки набережной [4].

Для моделируемой типовой модели склона коэффициент устойчивости 0,94, соответствующий завершению фазы быстрого смещения, с учетом объемного ха-

рактера крупного фронтального оползня достигается при вертикальной амплитуде смещения 12,5–13,0 м (см. рис. 3). Язык оползня при этом оказывается выдвинутым в реку на 24 м (включая его подводную часть). Дальнейшее смещение массива в основном происходит уже в режиме глубинной ползучести по мере размыва выдвинувшейся языковой части рекой. Скорость смещения, видимо, может различаться на 1–2 порядка в зависимости от интенсивности размыва, количества осадков и т.д. (с тем или иным запаздыванием), что и подтверждают данные режимных наблюдений. При замедлении размыва смещения затухают.

По всей видимости, высота стенки срыва на момент завершения основного смещения сильно зависит от общей высоты склона. Для двух инструментально изученных оползневых смещений, произошедших на сравнительно невысоких склонах в поселке Красная Пахра в 1960 г. и на Хорошевской набережной г. Москвы в 2006 г., высота стенки срыва составила лишь 3–4 м. А для наиболее высоких оползневых участков Воробьевых гор и в районе Фили г. Москвы по косвенным признакам можно предположить, что она была не менее 10–15 м.

В данной серии расчетов, осредненно моделирующих подобные оползни, можно ожидать одномоментного (первичного) основного смещения в пределах

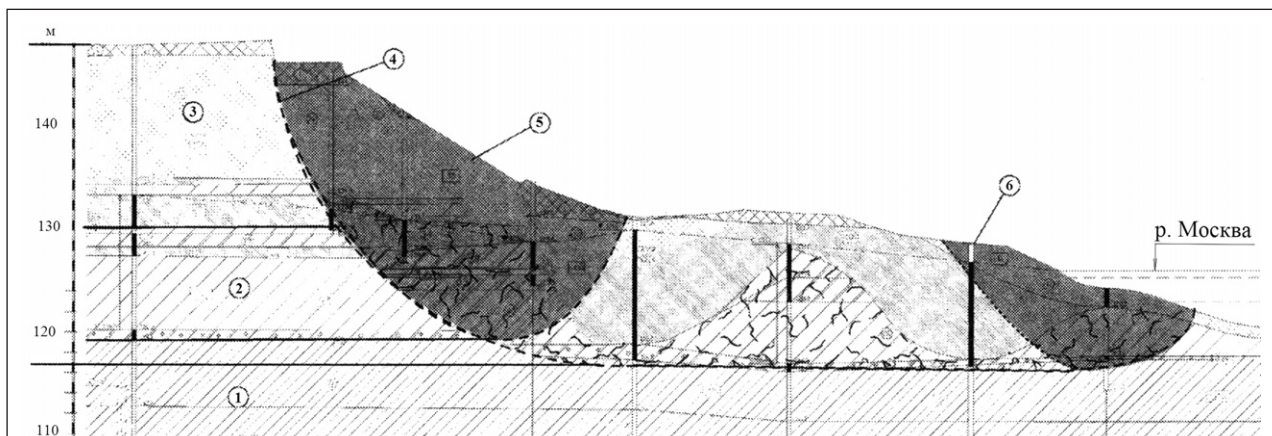
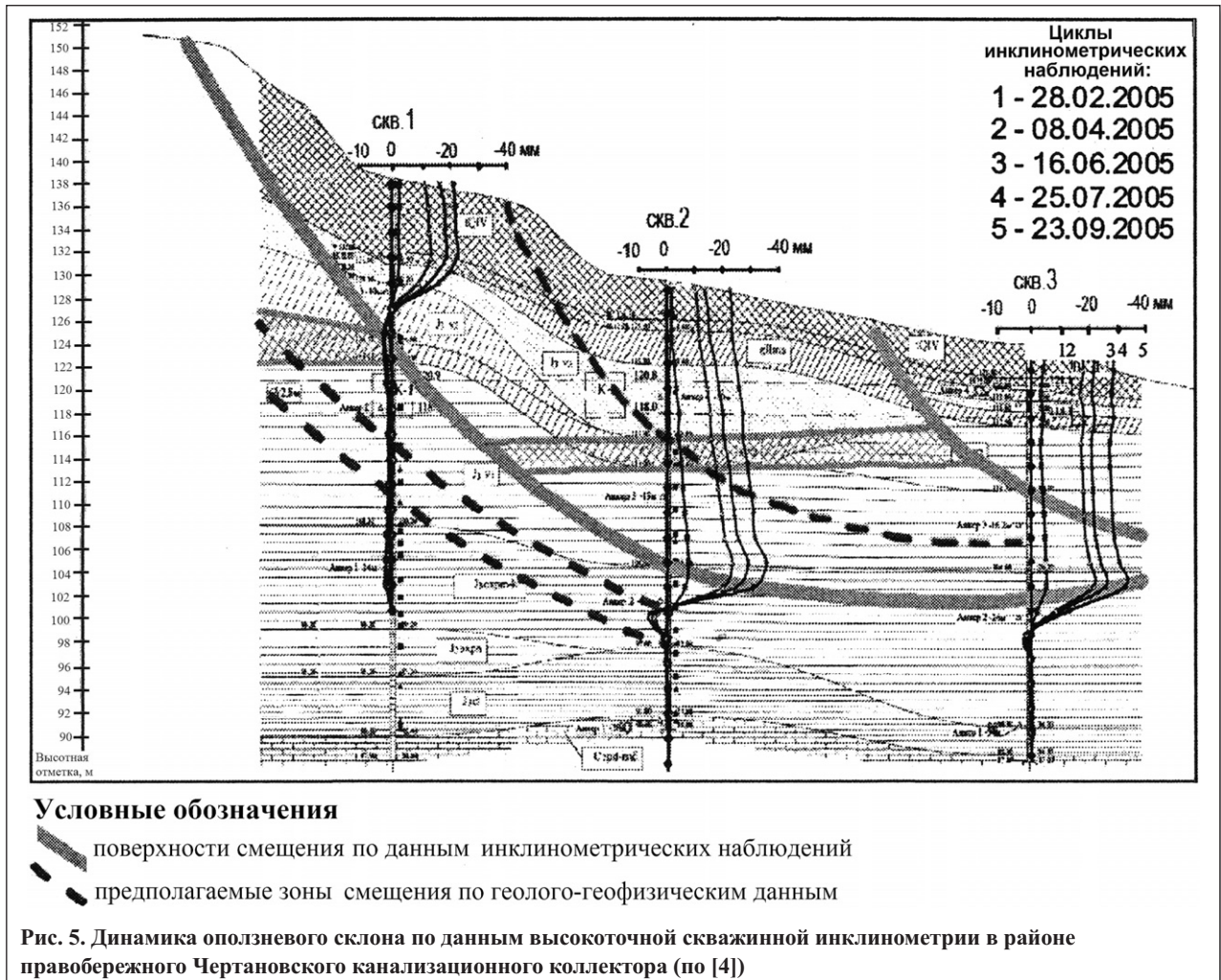
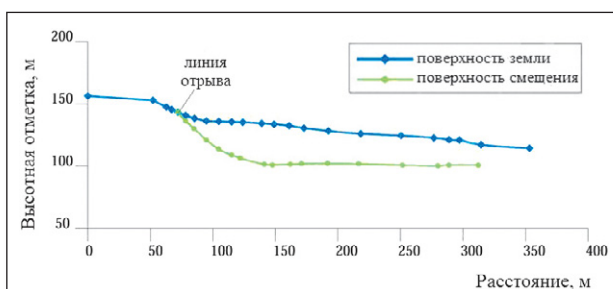


Рис. 4. Участок развития глубоких фронтальных блоковых оползней в районе Хорошево г. Москвы (по [23], с. 49). Условные обозначения: 1, 2 — соответственно глины оксфордского и волжского ярусов юрской системы; 3 — пески четвертичных отложений; 4 — поверхность скольжения; 5 — тело оползня; 6 — скважина



5–10 м по высоте, что меньше величины, полученной при расчетах для этапа III. Причина этого заключается, видимо, в том, что любые изменения напряженно-деформированного состояния в крупном массиве, неоднородном по прочностным и деформационным характеристикам слагающих его грунтов, происходят в течение относительно длительного времени, сопровождаясь формоизменениями, перестройками структуры грунтов, полей поровых давлений и т.д., в результате чего на стадии так называемого основного смещения реализуется лишь его первая фаза. В расчетах же предполагается одномоментный переход к новым прочностным характеристикам по всей зоне смещения.

В верхней части стенки срыва по мере смещения основного тела оползня вниз формируется новая зона



неустойчивости, в которой развиваются оползни второго порядка. Они были выявлены, в частности, при изысканиях на Воробьевых горах. Смещения вторичных оползней, вероятно, кратковременно ускоряют движение основного оползневого массива. Сформированная при этом стенка срыва имеет крутизну уже около 45° . В итоге за несколько столетий за счет делювиального смыва и образования мелких осовов сформировалась ныне наблюдаемая крутизна $33\text{--}37^\circ$.

Субгоризонтальные, порой значительные по размерам, поверхности у подножий стенок срыва подобных оползней формируются, по мнению автора, в единообразных условиях стабилизации уже смещенных блоков, а не в результате критического состояния непосредственно перед следующей оползневой фазой. Это сходство легко объяснимо, если учесть, что общие коэффициенты устойчивости подобных склонов в обоих случаях, как правило, не превышают 1,1 (естественно, если не проводились защитные мероприятия).

Дополнительными факторами выравнивания этих поверхностей являются:

- эрозионно-аккумулятивная деятельность реки при высоких паводках и повышение влажности климата в отдельные периоды голоцена (например, на части участков у подножий склонов в музее-заповеднике «Коломенское»);
- заполнение оползневых западин продуктами делювиально-пролювиального сноса на участках, по всей видимости, наиболее длительно подвергавшихся подмыву рекой с сопутствующим развитием блоковых

оползней (например, к северо-востоку от Дьякова гора в Коломенском и на выровненном участке в центральной части Воробьевых гор, располагающемся как раз напротив оси развития Лужнецкой поймы и в месте максимальной ширины русла р. Москвы).

Отложения, сформировавшиеся в результате такого выравнивания, были выявлены автором в ходе изысканий на указанных участках. Можно оценить и скорость их накопления. В частности, на оползневой ступени в 1,1 км к северу от смотровой площадки Воробьевых гор за 55 лет (с момента постройки в 1959 и по 2014 г.) открытая дренажная система была занесена делювиально-пролювиальными отложениями мощностью 1,0 м. При продолжительности полного оползневой цикла, оцениваемой В.В. Кюнтцелем [18] для этой территории в 300–350 лет, возможно накопление толщи мощностью около 6 м. Таким образом, подобные вышележащие поверхности являются более древними участками оползневой активности.

Выводы

Выполненное компьютерное моделирование, а также анализ доступных инженерно-геологических материалов, показывают реальность возникновения и развития глубоких оползней Москвы и Подмосковья по механизму сдвига.

Прочностные и деформационные характеристики четвертично-меловой толщи здесь вполне сравнимы с таковыми для верхнеюрских глинистых грунтов. Не отличаются последние и исключительной пластичностью, что в принципе не создает условий для реализации какого-либо специфического механизма выдавливания.

Весьма обширные данные бурения на оползневых участках практически единообразно подтверждают отсутствие какого-либо раздавливания и разрушения структуры пород основного деформируемого горизонта. Зоны смещения, наличие и расположение которых в том числе подтверждены данными инклинометрических наблюдений, либо вообще плохо выявляются по образцам керна, либо представляют собой слои глины нарушенной структуры мощностью, как правило, не превышающей 1 м.

Данные М.Н. Парецкой [22] о том, что сопротивление сдвигу смещенных (оползающих) и коренных верхнеюрских глинистых грунтов совершенно одинаково (вне узких зон сдвига, естественно), также подтверждают, что нарушения структуры грунтов при оползании нет, то есть смещение происходит едиными крупными блоками. Местами они раскалываются субпараллельно и субперпендикулярно бровке на несколько также достаточно крупных (в десятки тысяч кубических метров и более) блоков уже в процессе смещения.

Отметим, что выполненное физическое моделирование таких оползней Москвы также показало, что основное смещение происходит в узкой зоне [9].

Установленная М.Н. Парецкой закономерность для оползней, основной деформируемый горизонт которых представлен оксфордскими глинами (чем глубже залегает поверхность смещения, тем более «фронтальным» является оползень), объясняется, по-видимому, тем, что для оползней с более глубокой подошвой сильнее влияние сопротивления сдвигу по боковым сторонам оползневой тела. Соответственно, оползень на таких участках может сформироваться лишь при большой протяженности оползнеопасного массива вдоль склона, когда относительное влияние сопротивления сдвигу по боковым сторонам становится меньшим.

Все вышеизложенное, по мнению автора, позволяет уверенно говорить о том, что основное смещение крупных блоковых оползней в Москве и Подмосковье происходит на основе классического сдвигового механизма.

Отметим, что оползни этого же типа, связанные в первую очередь с деформированием юрских глинистых отложений, развиты также в долинах Оки, Сосны, их притоков, на некоторых участках долин Волги, Печоры, Вычегды и других северных рек. В качестве основного деформируемого горизонта там могут выступать помимо оксфордских глин кимериджские или келловейские глинистые отложения, реже глины волжского яруса [17].

Правильное определение механизма образования оползней непосредственно влияет на выработку методов их изучения и прогнозирования, на выбор расчетных схем при оценке устойчивости склонов и обеспечивает проектирование эффективных и экономичных противооползневых мероприятий. 📍

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аносова Л.А.* Влияние условий формирования и залегания на инженерно-геологические свойства глин и суглинков // Формирование инженерно-геологических свойств глинистых пород в процессе литогенеза. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 176–191.
2. *Аносова Л.А., Зиангиров Р.С., Робустова Т.И.* Исследование зависимости параметров ползучести глин от их состава и физических свойств // Инженерная геология. 1983. № 4. С. 26–35.
3. *Болдырев Г.Г.* Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. 696 с.
4. *Волков В.А., Алешин А.С., Галаганов О.Н., Леонтьев В.Н., Моисеенко С.А., Постоев Г.П., Скворцов А.Г.* Новый метод комплексных геолого-геофизических исследований при инженерно-экологических изысканиях в оползневой зоне // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 8. М.: ГЕОС, 2006. С. 210–214.
5. *Вялов С.С.* О проблемах реологии грунтов // Труды 1-го Всесоюзного симпозиума по реологии грунтов. Ереван: Изд-во Ереванского университета, 1973. С. 6–26.
6. *Гальперин А.М., Стрельцов В.И.* Литомониторинг на железорудных карьерах КМА // Инженерная геология. 1987. № 3. С. 3–14.
7. *Голодковская Г.А., Егорычева М.Н.* Инженерно-геологические условия строительства Московского международного делового центра «Москва-Сити» // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 4. М.: ГЕОС, 2002. С. 195–199.

8. *Гребнев Ю.С.* Инженерная защита от опасных геологических процессов: руководство по расчету и проектированию противооползневых мероприятий. М.: ГЕОС, 2008. 274 с.
9. *Гулакян К.А., Кюнцель В.В., Новиков П.А.* Моделирование оползней выдавливания (на примере района Фили-Кунцево, Москва) // Труды ВСЕГИНГЕО. Вопросы инженерной геологии. 1970. Вып. 23. С. 109–125.
10. *Емельянова Е.П.* Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогноза оползней. М.: Недра, 1971. 102 с.
11. *Ивочкина М.А.* Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости отвалов фосфогипса: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Санкт-Петербург, 2012. 20 с.
12. *Игнатова О.И.* Деформационные и прочностные характеристики юрских глинистых грунтов Москвы // Инженерные изыскания. 2009. № 12. С. 36–40.
13. *Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Тимофеев Е.М.* Новый подход к расчету устойчивости оползневых склонов // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2008. № 1. С. 21–29.
14. *Карадулова З.М., Руденко В.И.* К вопросу об учете реологических свойств глинистых грунтов при оценке степени устойчивости склонов и откосов // Труды СоюзДорНИИ. Оценка инженерно-геологических условий и расчет устойчивости склонов и откосов при проектировании земляного полотна в сильнопересеченной местности. М.: Изд-во СоюзДорНИИ, 1980. С. 120–126.
15. *Котлов Ф.В.* Изменения природных условий территории Москвы под влиянием деятельности человека и их инженерно-геологическое значение. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 256 с.
16. *Кузнецов А.И., Моисеенко С.А., Волков В.А.* Опыт использования данных геодезического мониторинга для построения поверхности скольжения оползня // Инженерные изыскания. 2011. № 2. С. 56–59.
17. *Кюнцель В.В.* Закономерности оползневых процессов на Европейской территории СССР и его региональный прогноз. М.: Недра, 1980. 213 с.
18. *Кюнцель В.В.* О возрасте глубоких оползней Москвы и Подмосковья, связанных с юрскими глинистыми отложениями // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отд. Геология. 1965. Т. 40. № 3. С. 93–100.
19. *Маслов Н.Н.* Основы механики грунтов и инженерной геологии. М.: Научно-техническое изд-во Министерства автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР, 1961. 707 с.
20. *Маслов Н.Н., Котов М.Ф.* Инженерная геология. Л.: Стройиздат (Ленинградское отделение), 1971. 346 с.
21. *Парецкая М.Н.* Об изменчивости свойств юрских глинистых пород на оползневых участках Москвы // Труды ВСЕГИНГЕО. Вопросы изучения оползней и факторов, их вызывающих: тематический сборник. 1968. Вып. 8. С. 96–101.
22. *Парецкая М.Н.* Характеристика прочности и деформируемости юрских глинистых пород и их влияния на оползни Подмосковья: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 1972. 20 с.
23. *Постоев Г.П.* Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.-СПб.: Нестор-История, 2013. 100 с.
24. *Проворова Е.С.* Строение толщи и инженерно-геологические особенности нижнемеловых грунтов территории г. Москвы: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2010. 21 с.
25. *Тихвинский И.О.* Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 144 с.
26. *Троицкая М.Н.* О прочности грунтов и методике определения сопротивления сдвигов // Труды Совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Т. 2 (под ред. В.А. Приклонского). М., 1957. С. 99–105.



Журнал «Инженерная геология»

стал одним из наиболее востребованных печатных изданий в нашем профессиональном сообществе. Сотрудники редакции постоянно работают над дальнейшим повышением качества журнала. Все статьи проходят рецензирование членами редакционной коллегии и рецензентами, научное и литературное редактирование. Вы, читатели, можете внести свой вклад в развитие журнала, присылая в редакцию свои статьи и подписываясь на «Инженерную геологию».

E-mail: info@geomark.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ», «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»,
«ГЕОТЕХНИКА» И «ГЕОРИСК»



Реклама

**Стоимость годовой подписки на журналы
(через редакцию) с учетом почтовых расходов и НДС:**

- «Инженерные изыскания» (14 номеров) – 9660 рублей.
- «Инженерная геология» (6 номеров) – 3600 рублей.
- «Геориск» (4 номера) – 2400 рублей.
- «Геотехника» (6 номеров) – 3900 рублей.

Полный комплект журналов — 19560 рублей.

ОТДЕЛ ПОДПИСКИ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ

+7 (495) 210-89-92

PR@GEOMARK.RU
WWW.GEOMARK.RU

Подписку на журналы можно оформить через подписные агентства:

Оформление подписки на журналы возможно через агентства «Роспечать» и «Урал-пресс». Стоимость подписки устанавливается агентствами самостоятельно и может отличаться от стоимости, указанной редакцией.

Подписные индексы ОАО «Агентство "Роспечать"»

| | |
|------------------------|-------|
| «Инженерные изыскания» | 71509 |
| «Инженерная геология» | 36611 |
| «ГеоРиск» | 71510 |
| «Геотехника» | 22780 |

Подписку через агентство «Урал-пресс» можно оформить на официальном сайте — www.ural-press.ru