

ОПОЛЗНЕВАЯ АКТИВНОСТЬ ВОСТОЧНОГО УЧАСТКА ВОРОБЬЕВЫХ ГОР В МОСКВЕ И ВОЗНИКАЮЩИЕ УГРОЗЫ

Кропоткин М.П.¹, Батурин В.И.²

(1-ООО НПП «Сингеос», г. Москва, 2-ГПБУ «Мосэкомониторинг», г. Москва)

Аннотация: Рассмотрены результаты компьютерного моделирования и данных режимных наблюдений по грунтовым и глубинным реперам восточного участка Воробьевых гор в Москве. Использована программа, осуществляющая поиск зоны смещения с минимальным коэффициентом устойчивости. Обоснованы расчетные параметры. Установлено, что склоновый массив находится в состоянии установившейся ползучести без перспектив затухания деформаций. Геодезические наблюдения по сети грунтовых реперов показали в цикле октябрь 2016 – октябрь 2017 гг. резкое ускорение смещений левого крыла оползневого цирка, что обуславливает возрастание оползневого риска для находящихся там важных объектов.

Ключевые слова: оползни, Москва, расчеты, моделирование, режимные наблюдения.

Оползни являются одними из наиболее распространенных и опасных для человека, биоты и техносферы природных и природно-техногенных экзогенных процессов. В Московском регионе, в т.ч. в районе Воробьевых гор, широко развиты блоковые оползни, смещение которых связано с верхнеюрскими глинами. Они, как правило, значительные по площади и с большой глубиной захвата, что обуславливает возможность серьезного ущерба от их развития и сильно затрудняет стабилизирующие мероприятия.

В восточной части Воробьевых гор известняки (С₂₋₃) перекрываются мощной толщей верхнеюрских глин келловей-оксфорда (J_{3cl-ox}), на которых залегают суглинки и глины кимериджского яруса (J_{3km}) и пески и алевроиты с прослоями суглинков титона верхней юры –нижнего мела (J_{3tt+K₁}). Венчают разрез четвертичные отложения – моренные и покровные суглинки и флювиогляциальные суглинки и пески. Высота бровки склона над нынешним уровнем воды в Москве-реке здесь 35-60 м. Массив, за исключением верхних 15–25 м на «плато», обводнен, напоры достигают местами 30 м.

Основным фактором возникновения и активизации глубоких оползней на этом участке являлся, подмыв основания склона Москвой-рекой. Максимальные зафиксированные паводки вызывали в прошлом подъем уровня на 8,5 м над меженным, то есть до абсолютной отметки около 126 м.

До 1959 г. оползни Воробьевых гор в целом находились в активном состоянии. Геодезические наблюдения, проводившиеся здесь с 1954 г., фиксировали в этот период значительные смещения наблюдательных реперов, наибольшие из которых (свыше 40 мм/мес.) наблюдались в 250–300 м ниже по течению реки от метромоста. Здесь же наблюдались многочисленные и наиболее значительные по размерам трещины, и срывы. В 1959-61 гг. на Воробьевых горах был выполнен комплекс противооползневых мероприятий: некоторое уположение склона посредством выноса линии регулирования в реку; пригрузка основания склона отсыпкой банкета между новой и старой линиями регулирования; прекращение бокового и донного размыва устройством стенки набережной и каменной наброски перед ней; дренирование высачивающихся на склоне подземных вод; общее благоустройство. Созданный дренаж в нижней части склона прекратил суффозию и развитие многочисленных суффозионных оползней и оползней выплывания, разрушавших склон и уменьшавших мощность естественного «контрбанкета» из оползших блоков, но склон в целом на многих участках Воробьевых гор остался в состоянии, близком к предельному равновесию.

После осуществления этих мероприятий смещение глубоких оползней замедлилось, но не прекратилось. Суммарные в период 1975 – 1983 гг. величины изменения планового положения марок и реперов, даже в средней и нижней частях склона вблизи Метромоста, составили 54–66 мм с направлением в сторону реки, что было отражением глубоких оползневых деформаций.

Основным очагом активизации являлась часть склона против Института химической физики и правительственных жилых строений (рис.1,2).



Рис. 1. Схема Воробьевых гор

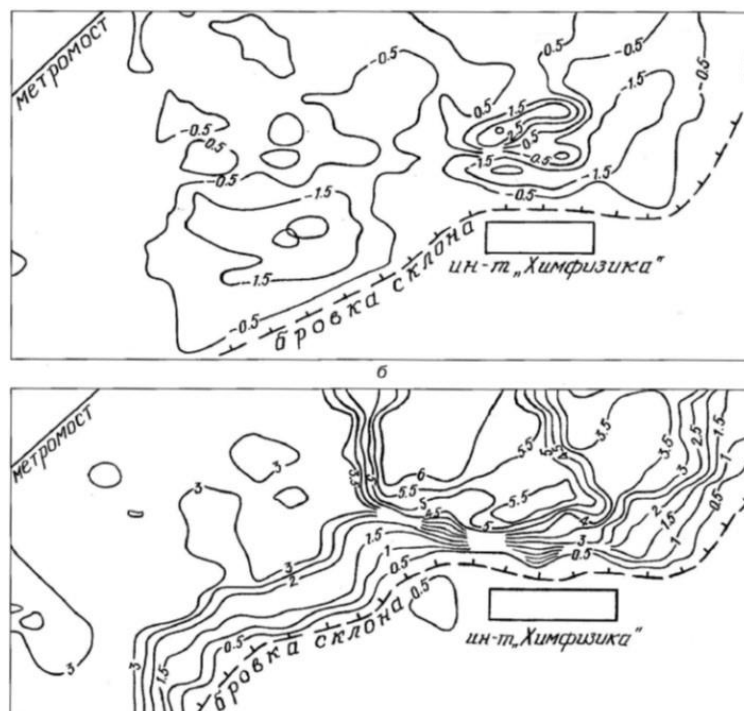


Рис. 2. Среднемноголетние скорости высотных (а) и плановых (б) оползневых смещений на Воробьевых горах в период 1974-1995 г., мм/год

Суммарные величины смещений на склоне под правительственными зданиями и в стенке набережной составили к середине 1990-ых годов соответственно 190 и 130 мм

[3]. Максимальные деформации на набережной в 1990-х годах отмечались в 150 м вниз по течению реки от метрооста.

В рамках данной работы выполнялся анализ современной оползневой активности восточной части Воробьевых гор с использованием компьютерного моделирования и данных режимных наблюдений по грунтовым и глубинным реперам.

Сдвиговый механизм формирования и развития подобных крупных блоковых оползней позволяет использовать при оценке их устойчивости принципы и программные средства, разработанные для оползней сдвига (срезания) [1]. Компьютерное моделирование выполнялось для левого крыла оползневой цирка, характеризующегося резким возрастанием активности смещений, а также большей обеспеченностью инженерно-геологическими данными: на участке около 50 выработок глубиной до 99 м, пробуренных в 1956-2017 гг., из которых непосредственно на разрезе использовано 36 скважин. Направление расчетного профиля было выбрано как среднее между направлением максимальной крутизны рельефа на данном участке и направлением смещения наблюдательных реперов (рис. 3).

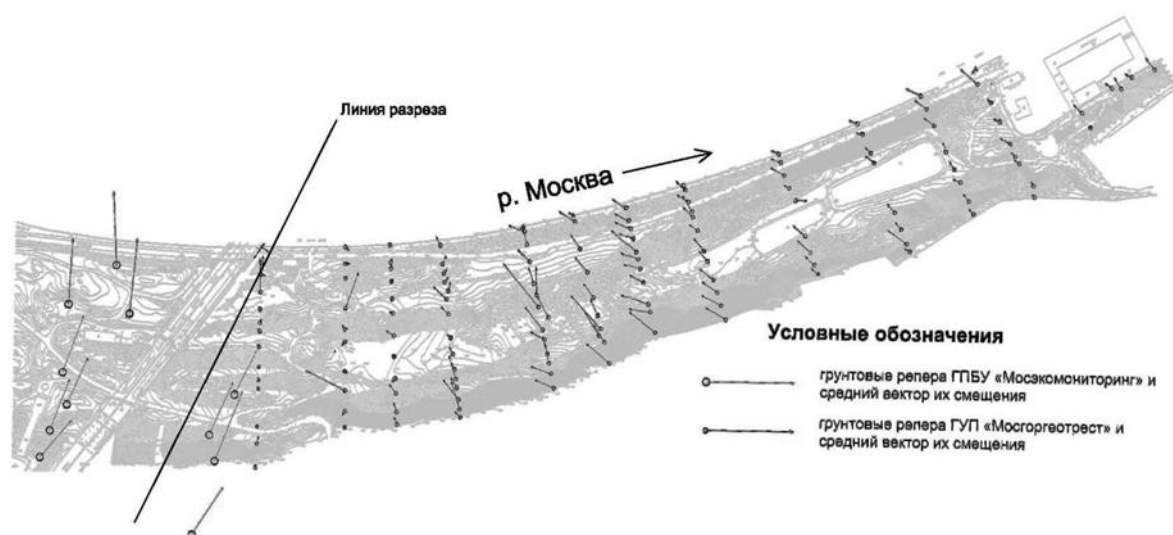


Рис. 3. Расположение грунтовых реперов и вектора их смещений за 2008-2016 гг. в восточной части оползневого участка Воробьевых гор

Использованные при компьютерном моделировании программные средства

Для расчетов был использован блок программного комплекса PSK [2]. 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 величин сил и направления приложения взаимодействия по граням расчетных отсеков и соответствующих напряженному состоянию массива непосредственно перед началом смещения оползня.

Специальная подпрограмма производит автоматическое разбиение модели склона на отсеки заданного размера, который регулируется по высоте и по горизонтали в широких пределах, и методом интерполяции выполняет расчет высотного положения дневной поверхности, границ слоев, уровня грунтовых вод (УГВ) и пьезометрических уровней в каждом вертикальном сечении, являющемся границей между отсеками. 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.

Коэффициент устойчивости на каждом шаге поиска рассчитывается итерационным методом путем решения системы уравнений равновесия горизонтальных и вертикальных сил, осуществляется автоматизированный поиск реальной или потенциальной поверхности смещения оползня с минимальным коэффициентом устойчивости при любой ее форме без ограничений по количеству точек перегиба. Кроме коэффициента устойчивости и положения поверхности смещения рассчитывается усилие взаимодействия (сжатия, растяжения) по границам условных блоков.

Значения коэффициента устойчивости (K_y) по поверхности смещения, задаваемой специалистами интуитивно, как правило, оказываются на 10-20 % выше величин K_y , определяемых с помощью программ PSK. Многократно проводилось сопоставление итогов расчетов устойчивости с результатами, полученными традиционными методами (не при предварительно найденном с помощью программ PSK положении опаснейшей поверхности потенциального смещения), а также с расчетами на основе численных методов определения напряженно-деформируемого состояния (НДС) с использованием широко известных программ «PLAXIS», «Phase 2», «FLAC-Slope». Все расчеты показали высокую сходимость, различия в величине K_y не превышают первых процентов.

Таким образом, программный комплекс PSK позволяет существенно повысить точность оценки устойчивости, возможных размеров, мощности и объемов оползневых тел, границ «зон безопасности», величин оползневого давления в сравнении с традиционными инженерными методами расчета.

Расчетные параметры

Важнейшими параметрами, во многом определяющими достоверность расчетов устойчивости и прогноза развития оползневого процесса, являются физико-механические свойства грунтов.

Данные по прочности *верхнеюрских* и *нижнемеловых грунтов* преимущественно включают результаты консолидированно-дренированных испытаний, в обильно обводненных массивах их, естественно, нельзя использовать непосредственно. В условиях природного массива факторов для возникновения дренирования (выдавливания поровой влаги) просто нет, исключая, естественно, локальные участки, возникающее в теле уже смещающегося оползня. Отдельные данные по неконсолидированно-недренированным испытаниям без фиксации порового давления в ходе опыта, относительно пригодны лишь для узкого круга расчетов устойчивости (быстро возводимые насыпи и т.д.). Величина порового давления в суглинках и глинах верхней юры в данном случае может быть достаточно точно установлена по величине напоров (практически до УГВ), замеренных рядом скважин в многочисленных прослоях песка там. Поэтому для этих РГЭ выполнялся расчет $\phi_{эф}$. Естественно, для всех РГЭ, где использован параметр $\phi_{эф}$, из расчетов был исключен учет «взвешивания».

Характеристики грунтов задавались на основе их нормативных значений. Схематизированная модель включает 10 расчетных грунтовых элементов (РГЭ), использованные характеристики грунтов приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Свойства грунтов, использовавшихся при расчетах участка у метромоста

№ РГЭ	Угол внутреннего трения, град.			Сцепление, т/м ²			Плотность, т/м ³			Эфф. пористость, доля ед.
	выше УГВ	в/н	с учетом порового давления	выше УГВ	в/н	C_c/C_w	выше УГВ	в/н	с учетом взвешивания	
	16	16	16	4,0	4,0	1,5/2,5	2,03	2,06	–	0,07
	18	18	17	3,0	3,0	1,5/1,5	2,10	2,13	–	0,05
	25	22	22	0,6	0,6	0,5/0,1	1,85	1,93	0,95	0,18

	–	15	8,6	–	2,8	1,8/1,0	–	1,77	–	0,02
	19	–	–	3,3	–	2,3/1,0	2,15	–	–	0,03
	28	26	26	–	2,3	1,8/0,5	1,90	2,02	1,02	0,12
	–	17	10,6	–	6,5	4,5/2,0	–	1,93	–	0,04
	–	5	3,2	–	1,7	–/1,7	–	1,75	–	0,06
	–	13	5,1	–	10, 8	8,1/2,7	–	1,78	–	0,02
0	–	15	8,5	–	9,0	6,7/2,3	–	1,88	–	0,01

Примечание: C_c – структурное сцепление, C_w – сцепление связности, v/n – в водонасыщенном состоянии.

В расчетах принималось введенное Н.Н. Масловым в рамках физико-технической теории ползучести разделение общего удельного сцепления на структурное сцепление (C_c) и сцепление связности (C_w) и условий:

- общего сопротивления глинистых грунтов сдвигу: $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + C_c + C_w$;
 - возникновения установившейся ползучести: $\tau \geq \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + C_c$;
 - продолжения ползучести без перехода в стадию затухания: $\tau \geq \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + C_w$,
- где τ – сдвигающее напряжение, σ – нагрузка, φ_w – угол внутреннего трения.

Сцепление в грунтах зоны смещения (РГЭ-8), уже нарушенных подвижками предыдущих оползневых блоков, по лабораторным данным может варьировать от 11 до 38 КПа, при среднем значении около 25 КПа. Для уточнения были выполнены две серии обратных расчетов. Первая выполнена для существовавшего оползневого тела, принимая, что до 1959 г. оно находилось в состоянии установившейся ползучести. Был задан рельеф, существовавший до 1959 г. Коэффициент устойчивости (K_y) 0,95, соответствующий предельному состоянию (то есть $K_y = 1,00$) фронтального оползня в объемной постановке, был получен при сцеплении 16 КПа. Вторая серия расчетов была выполнена, исходя из факта, что весь массив, включая забровочную часть, не находился и не находится в стадии прогрессирующего разрушения, то есть при задании общего сцепления в массиве (за пределами уже существующего оползневого тела) коэффициент устойчивости, соответственно, не должен быть ниже 0,95. При этом для РГЭ-8 получено сцепление 18 КПа. Получаем неравенства $C \leq 16$ КПа, $C \geq 18$ КПа, очевидно не имеющие общего решения. Однако с учетом реальной точности методов для РГЭ-8 возможно принять сцепление 17 КПа как приближенное значение, отвечающее обоим условиям.

Результаты расчетов устойчивости и режимных геодезических наблюдений

При задании величин удельного сцепления всех РГЭ, кроме РГЭ-8, равных структурному сцеплению (C_c), минимальный рассчитанный коэффициент устойчивости в двухмерной постановке составил 0,905, то есть ниже величины $K_y \approx 0,95$, соответствующей $k = 1,0$ для реально трехмерного фронтального оползневого тела. Для этого же массива с рельефом, существовавшим до 1959 г., получен минимальный $K_y = 0,915$ (рис. 4).

Ширина потенциального оползневого блока на «плато» по расчету составила 38 м, что хорошо согласуется с фактическими размерами блоков, сформированных при предыдущих оползневых циклах (рис. 5). Таким образом, расчеты подтверждают переход массива в стадию ползучести. Сцепление связности (C_w) у грунтов всех РГЭ меньше C_c , из чего следует, что согласно условию (1) процесс склоновых деформаций самопроизвольно не прекратится. Об этом говорят и полученные невысокие значения коэффициента устойчивости.

С 1995 по 2006 г. наблюдения на восточном участке Воробьевых гор велись по весьма небольшому числу реперов со значительными перерывами между измерениями. В настоящее время на описываемой территории существует в целом достаточно разви-

тая сеть грунтовых реперов, однако период наблюдений по ним не превышает 10 лет, а по ряду реперов он еще меньше (рис. 3). На склонах, прилегающих к Метромосту, наблюдения выполняются как ГПБУ «Мосэкомониторинг», так и ГБУ «Мосгоргеотрест», восточнее – лишь «Мосгоргеотрестом».

По данным режимных геодезических наблюдений ГПБУ «Мосэкомониторинг» (2008–2017 гг.) на рассматриваемом участке зона горизонтальных смещений поверхностных реперов (заглубленных ниже слоя промерзания) простирается на расстояние до 80 м за бровкой «плато» (рис. 3).

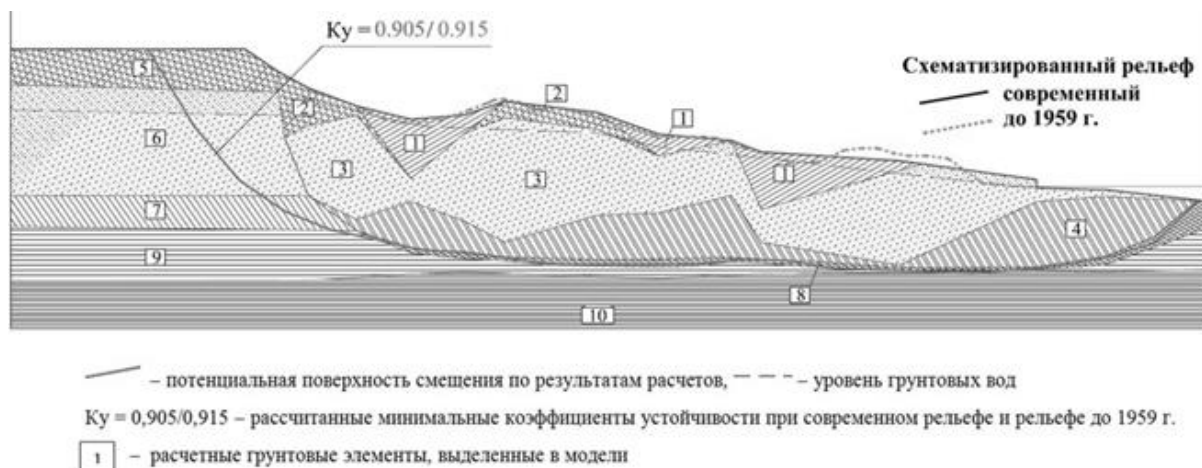


Рис. 4. Результаты расчетов устойчивости

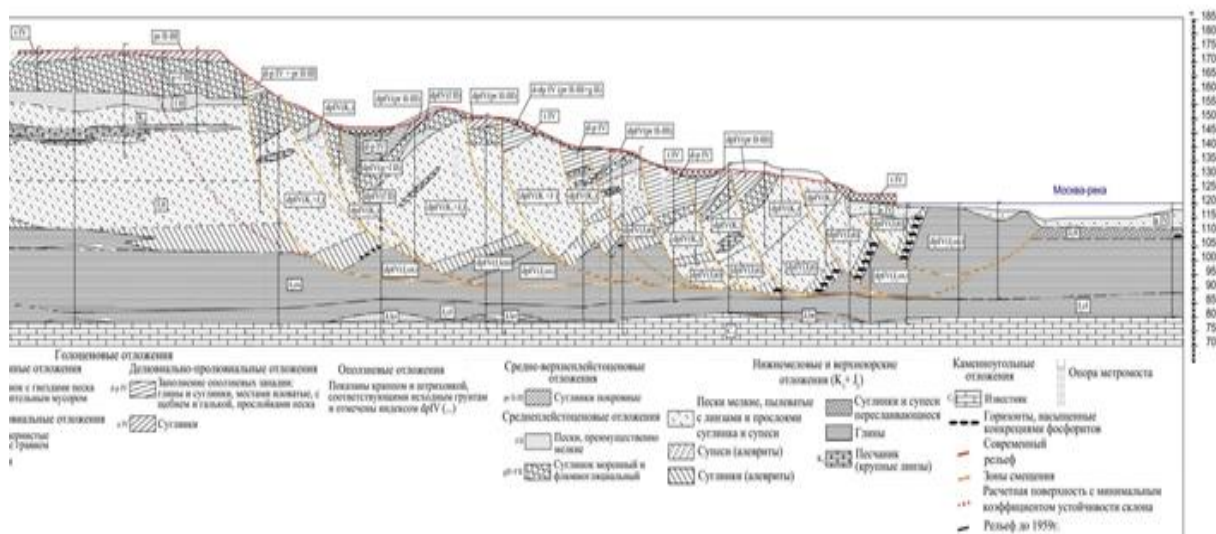


Рис. 5. Разрез восточнее Метромоста

Суммарная величина смещений составляет 105-140 мм за 9 лет наблюдений при точности измерений несколько мм (табл.2). Весьма показательно также практически полное совпадение величин направления горизонтальных смещений у реперов, расположенных на склоне и «плато» (рис. 3). На остальной территории Воробьевых гор реперы на «плато», за исключением некоторых, находящихся в 1–3 м от бровки, никаких смещений не испытывают. Подобный характер плановых смещений при незначительных вертикальных смещениях всех реперов (опускание их на 4–10 мм за 9 лет) говорит о движении всего этого массива как единого целого, причем в субгоризонтальном направлении, а не в режиме раздавливания верхнеюрских грунтов.

Таблица 2

Смещение реперов восточнее Метромоста за 2008-2017 гг.

№ реперов	Смещение в плане, мм	Смещение по высоте, мм	Азимут смещения, град
5/4	105,2	-4	29,0
5/3	108,7	-10	25,6
5/2	139,3	-9	23,3
5/1	106,8	-8	35,5

Среди всех наблюдательных инклинометрических скважин на Воробьевых горах максимальные величины смещений также зафиксированы в скважинах, которые расположены вблизи Метромоста с его восточной стороны (V-2 и V-3) (рис.6).

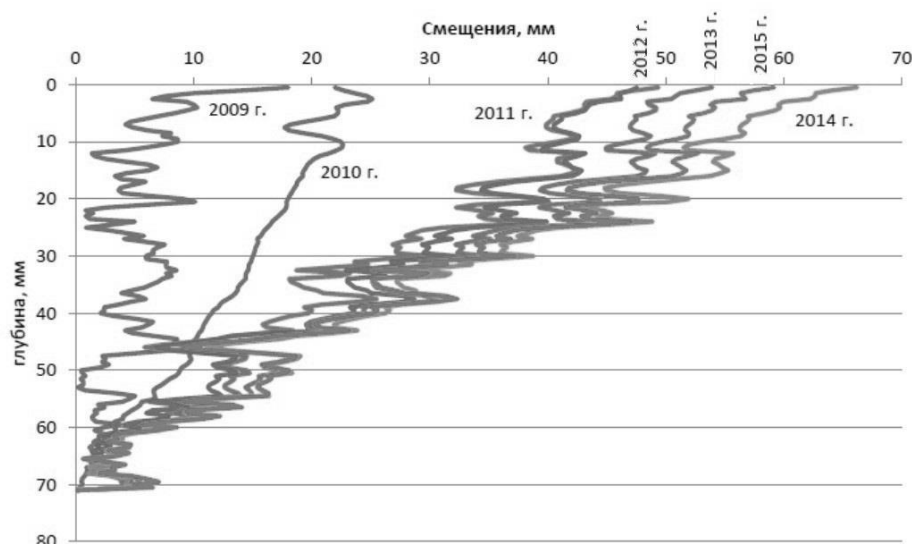


Рис. 6. Полное смещение профиля скважины V-3

Осадки деформационных знаков (реперов и марок) восточнее Метромоста, исходя из данных ГБУ «Мосгоргеотрест», в целом незначительные и в большинстве случаев находятся в пределах точности измерений. Лишь для 15 реперов, разбросанным по разным частям территории, суммарная осадка за 10 лет превышает 15 мм. Наибольшие величины осадок зафиксированы в центральной части цирка (рис. 7).

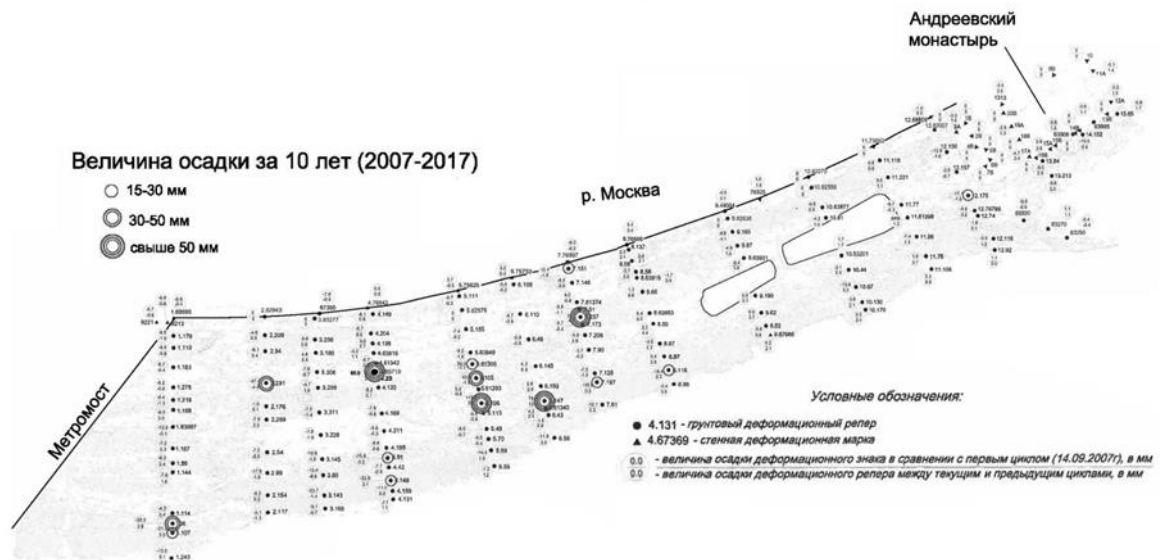


Рис. 7. Схема расположения деформационных знаков с указанием величин их осадок на деформационной площадке «Воробьевы горы (Восточная)» (15 цикл)

Интерпретация данных режимных геодезических наблюдений за *плановыми* смещениями грунтовых реперов выполнялась двумя способами.

В первом предполагалось, что ошибки в определении координат реперов носят в основном несистематический характер и, соответственно, в выборках достаточного объема в основном взаимно компенсируются. В расчет при этом брались данные по всем реперам, за исключением тех, смещения которых наиболее значительны, т.к. последние, в основном, отражают локальные перемещения отдельных блоков и субблоков. Таким образом, эти данные характеризуют изменение общей динамики оползневого массива (цирка) и его наиболее крупных элементов: центральной части, левого и правого крыльев (рис. 8).

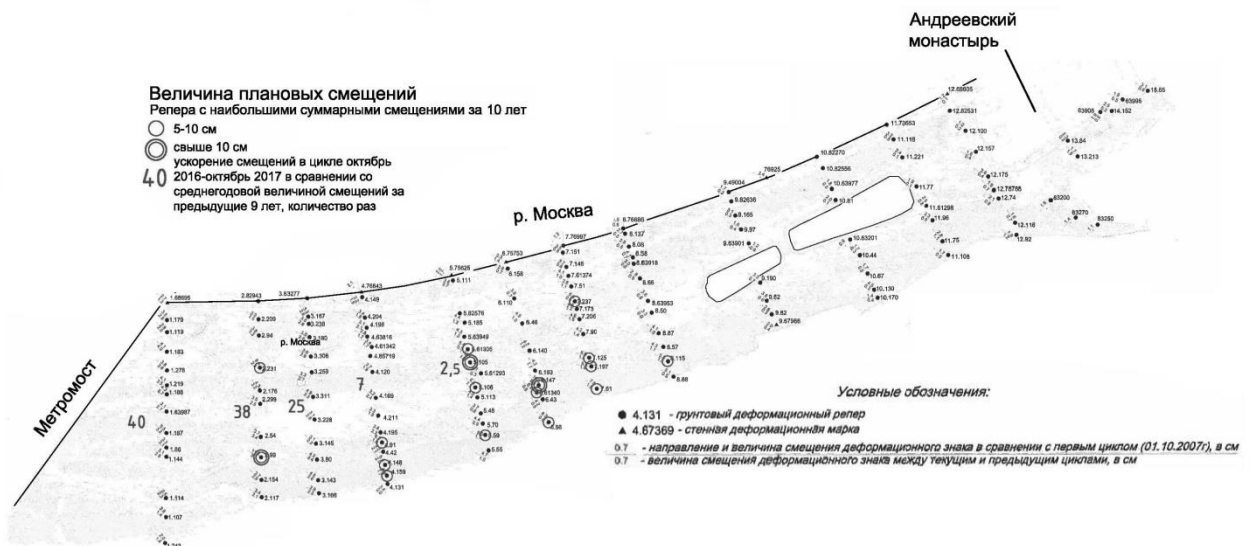


Рис. 8. Схема расположения деформационных знаков с указанием величин их плановых смещений и степени их ускорения, рассчитанной первым способом, в период октябрь 2016–октябрь 2017 г., в сравнении со среднемноголетним уровнем предшествующего периода.

Репера ближнего к Метромосту ряда (профиля), за исключением Рр 1.183, имели за 9 лет (2007-2016 гг.) среднее плановое смещение 6 мм, в том числе за цикл «октябрь 2015 – октябрь 2016 г.» 5 мм, т.е. и то, и другое значение фактически находится в преде-

лах точности измерений, а в 15-м цикле (X/16-X/17) они «поползли» – среднее смещение за год у них составило 26 мм, т.е. скорость возросла в 40 раз!

По реперам следующего ряда картина в целом аналогична. Исключив активно смещающиеся Rp 2.231и Rp 2.99, суммарное за 9 лет смещение здесь составляло в среднем 7 мм, а за последний цикл оно составило около 30 мм, т.е. ускорилось более чем в 38 раз.

По реперам 3-го профиля среднегодовое смещение возросло меньше, но также весьма значительно – более чем в 25 раз.

Мы видим, что произошла резкая активизация смещений левого (западного) крыла массива, степень которой затухает к центральной части, которая характеризовалась ранее максимальной активностью смещений. В районе правого крыла массива какая-либо активизация смещений поверхностными реперами не фиксируется.

Во втором способе анализа, напротив, были исключены все репера, смещения которых в последнем цикле не превышают точности измерений. Кроме того, каждый реперный профиль был разделен на 2 зоны: верхнюю (бровка и стенка срыва) и нижнюю (остальная часть). По учитываемым реперам также рассчитывались приращения скорости смещения реперов в последнем цикле по отношению к среднегодовой скорости за предыдущие 9 лет (рис. 9).

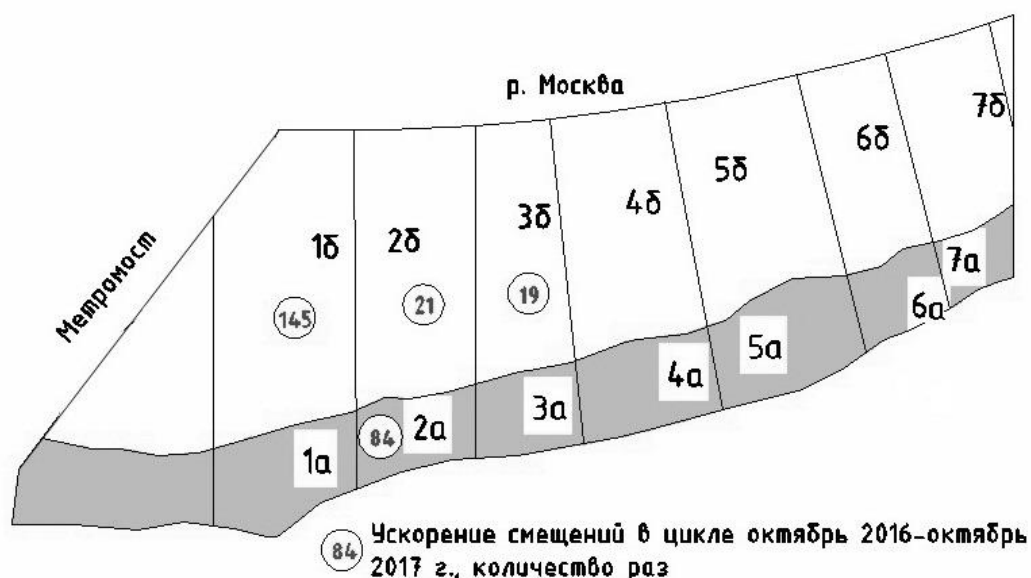


Рис. 9. Схема ускорений смещения, рассчитанных вторым способом

Картина получена в принципе аналогичная, с резким ускорением смещений левого крыла и быстрым его затуханием к центру цирка. Наибольшие ускорения смещений характерны для нижней части профилей, за исключением профиля 2. По профилям 4-7 смещения всех реперов находятся в пределах точности измерений.

В массиве в настоящее время, видимо, реализуются деформации двух видов:

- периодическое «проскальзывание» блоков тела существующего оползня по зонам смещения малой мощности, после чего возможны многолетние перерывы в подобных деформациях;
- постепенное «перекашивание» в направлении базиса оползания всего оползневого тела как целого, включая участок «плато» за бровкой, при котором величины смещений нарастают к дневной поверхности. Эти деформации непрерывны, хотя скорость их колеблется.

Можно прийти к выводу, что на данном участке в настоящее время реализуется первая стадия пластического деформирования со сравнительно небольшими скоростями

ми деформаций. Мы не имеем точных сведений о том, какая часть периода подобных деформационных процессов уже прошла. Однако, исходя из морфологического облика рельефа и мощностей отложений, накопленных в оползневых западинах (рис.5), можем утверждать, что это основная, а возможно, и подавляющая (более 90 %) часть.

В связи с этим резкое возрастание скоростей деформирования в последнем цикле является весьма тревожным симптомом в случае его устойчивого характера, о чем можно будет уверенно говорить после обработки замеров октября 2018 г.

Литература

1. Кропоткин М.П. Природа крупных оползней Москвы и Подмосковья // Инженерная геология. 2016. № 1. С. 4-14.
2. Кропоткин М.П. Расчеты устойчивости склонов с использованием алгоритмов минимизации коэффициента устойчивости // Инженерные изыскания. 2017. №1. С. 20-30.
3. Москва: геология и город / Гл. ред. В.И. Осипов, О.П. Медведев. – М.: АО «Московские учебники и Картолитография», 1997. 400 с.