

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Кропоткин Михаил Петрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
АКТИВИЗАЦИИ БЛОКОВЫХ ОПОЛЗНЕЙ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОИСКА НАИБОЛЕЕ
ОПАСНОЙ ЗОНЫ СМЕЩЕНИЯ**

Специальность 25.00.08 – инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре инженерной и экологической геологии
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – *Калинин Эрнест Валентинович, доктор геолого-минералогических наук, профессор*
- Официальные оппоненты** – *Фоменко Игорь Константинович, доктор геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ), гидрогеологический факультет, профессор*

Круподеров Владимир Степанович, доктор геолого-минералогических наук, профессор

Стром Александр Леонидович, кандидат геолого-минералогических наук, Центр службы геодинамических наблюдений в энергетической отрасли (ЦСГНЭО), филиал АО «Институт Гидропроект», главный эксперт

Защита диссертации состоится 15 декабря 2017 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.04.01 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д.1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»

https://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/28577216

Автореферат разослан 8 ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук



Н.А. Харитонова

Актуальность темы диссертации. Оползневые явления являются одними из наиболее распространенных и опасных для человека, биоты и техносферы природных и природно-техногенных экзогенных процессов.

В Московском регионе 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. Оползни характеризуются преимущественно регрессионным (вглубь склона) характером развития и весьма длительными (десятки и сотни лет) периодами медленных (1–30 см/год) деформаций, сменяющихся короткими периодами их активизации с величинами смещения в несколько метров и более.

В Московской агломерации активизация этих оползней угрожает крупным мостам (Метромост на Воробьевых горах, железнодорожный мост в Сабурово), зданиям жилого, административного, научного (здания Президиума РАН, институт Химфизики и др.) спортивного и производственного назначения, транспортным коммуникациям, древним храмам (в т.ч., находящимся в списках объектов культурного наследия ЮНЕСКО), различным трубопроводам, в том числе магистральным канализационным коллекторам (повреждения которых чревато загрязнением почвы, подземных и поверхностных вод). В Москве многие участки развития этих оползней также являются важными зонами отдыха мегаполиса (оползневые участки «Воробьевы горы», «Коломенское», «Фили-Кунцево» являются особо охраняемыми природными территориями), а активизация оползней резко ухудшает рекреационные качества ландшафтов (возникновение труднопроходимых или обводненных участков, разрушение лестниц, дорог, фуникулеров, набережных, прогулочных пристаней и др.).

Оползни этого типа до сих пор обычно относили к оползням выдавливания (раздавливания). Проведенный автором анализ предлагавшихся ранее методов оценки устойчивости данных оползней показал низкую эффективность этих методов. Кроме того, подобные представления почти полностью исключали возможность разработки и выполнения эффективных защитных мероприятий. Также в предложенных до сего времени защитных мероприятиях вообще практически не учитывались серьезные негативные экологические последствия их реализации.

Актуальность выбранной темы определяется необходимостью: определения реального механизма этих оползней, уточнения методов изучения и расчета их устойчивости, разработки принципов мониторинга и проектирования эффективных и экономичных противооползневых мероприятий, обеспечивающих при этом минимально возможный экологический ущерб.

Объектом исследования являются крупные блоковые оползни Московского региона.

Основным методом исследования этих оползней было математическое моделирование с использованием автоматизированного поиска наиболее опасной зоны смещения (с минимальным коэффициентом устойчивости) в сочетании с анализом данных режимных геодезических и инклинометрических наблюдений и различной инженерно-геологической информации.

Целью диссертационной работы является выявление механизма развития крупных блоковых оползней Московского региона и разработка методов оценки опасности и прогноза их развития с использованием автоматизированного поиска наиболее опасной зоны смещения.

Основные задачи исследования. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи диссертационной работы:

1. Разработка методики автоматизированного поиска поверхности (зон) смещения произвольной формы с минимальными значениями показателя коэффициента устойчивости.
2. Изучение механизма развития крупных блоковых оползней Московского региона.
3. Разработка принципов мониторинга и противооползневой защиты от этих оползней, обеспечивающих эффективность защиты и минимизацию негативного экологического воздействия при ее реализации.

Личный вклад автора заключается:

- в сборе, анализе и обобщении обширного опубликованного и фондового материала по участкам развития блоковых оползней Московского региона, включая инженерно-геологические условия, данные режимных наблюдений, физического моделирования и т.д.;
- в разработке геомеханических моделей и выполнении поэтапных расчетов устойчивости склонов для уточнения причин возникновения и развития этих оползней;
- в уточнении специфики изучения и оценки опасности крупных блоковых оползней Московского региона;
- в разработке предложений по противооползневым мероприятиям на участках их развития.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Обосновано, что блоковые оползни Московского региона по механизму фактически являются оползнями сдвига, а не раздавливания-выдавливания.
2. Установлено, что компьютерная программа, созданная с участием автора, выполняющая автоматизированный поиск потенциальных поверхностей (зон) смещения произвольной формы позволяет существенно уточнить значения минимального коэффициента устойчивости оползней сдвига, размеров, глубины подошвы и объемов оползневых тел, границ «зон безопасности», величин оползневого давления. Программа обеспечивает

определение минимального коэффициента устойчивости и формы потенциальной поверхности смещения, весьма близкие к получаемым при использовании численных методов (МКЭ, МКР и т.д.).

3. На основе выявленного механизма крупных блоковых оползней Московского региона определены наиболее эффективные методы прогнозирования блоковых оползней Московского региона.
4. В составе мероприятий противооползневой защиты от этих оползней впервые предложено использовать подводные (в русле реки) буронабивные сваи, самоизливающийся лучевой дренаж с бурением из оползневых западин, короткие сваи-шпонки, размещенные по глубине в районе зоны смещения, группы свай или контрбанкеты, работающие по контрфорсному принципу, искусственные выемки, либо устройство подземных сооружений малого заглубления для лишь частичной разгрузки головных частей формирующихся оползней.

Практическая значимость работы.

На основе уточненных представлений о природе блоковых оползней Московского региона предложен комплекс методов инженерной защиты на участках их развития.

Теоретические и методологические положения работы и выводы о природе блоковых оползней Московского региона могут быть использованы в учебных и научно-исследовательских целях.

Использование предложенных методов расчета, реализующих функцию поиска поверхности смещения с минимальным коэффициентом устойчивости, позволяет значительно повысить достоверность оценки и прогноза оползневой опасности, а также обеспечить повышение надежности и снижение стоимости противооползневых мероприятий. Внедрение этих методов в практику геодинамики является весьма актуальным.

С использованием изложенных в диссертации методических подходов (поэтапные расчеты с последовательным изменением параметров, использование при расчетах «эффективного угла внутреннего трения» и т.д.) и программных средств выполнена оценка устойчивости многих оползневых участков в ряде районов России, в том числе приведенная в диссертации оценка одного из важнейших оползневых участков города Москвы.

Положения, выносимые на защиту:

- блоковые оползни Московского региона по механизму являются оползнями сдвига, а не раздавливания-выдавливания, что подтверждается как данными выполненного математического моделирования на обобщенной модели и конкретном оползневом участке у Метромоста Воробьевых гор, так и формой зон смещения, мощностью и структурой этих зон, кинематикой процесса и идентичностью физико-механических

свойств грунтов в оползневых блоках и несмещенном массиве за пределами узкой зоны смещения;

- при расчетах устойчивости этих оползней, преимущественно имеющих весьма небольшой запас устойчивости, необходимо использовать алгоритмы и вычислительные программы, позволяющие в автоматическом или полуавтоматическом режиме осуществлять поиск поверхностей (зон) смещения произвольной формы с минимальным коэффициентом устойчивости, так как даже незначительные (на величину 1–4 % от толщины оползневого тела) отклонения положения в массиве расчетной поверхности смещения от ее опаснейшего положения увеличивают получаемый коэффициент устойчивости на 5–20%.
- на основе выявленного механизма развития крупных блоковых оползней Московского региона предложена методика их изучения и прогнозирования, основанная на совместном использовании морфометрических признаков (величины реализованных смещений, степень заполнения тыловых западин), оползневой съемки, результатов бурения и зондирования, лабораторных испытаний грунтов на ползучесть, расчетов устойчивости с использованием программ, осуществляющих поиск поверхностей (зон) смещения произвольной формы с минимальным коэффициентом устойчивости, режимных долгосрочных геодезических наблюдений;
- для этих оползней на основе их выявленного механизма предложен комплекс защитных мероприятий, включающий, кроме предотвращения размыва языковой части оползня: самоизливающийся лучевой дренаж с бурением из оползневых западин; короткие свайшпонки, размещенные по глубине в районе зоны смещения; буронабивные подводные сваи; контрбанкеты контрфорсного типа, использующие прочность блоков; частичную разгрузку формирующихся блоков в «голове» оползня устройством, в пределах зоны аэрации, поперечных искусственных выемок, либо подземных сооружений.

Достоверность научных положений и выводов обосновывается:

- составлением использованных в диссертации геомеханических моделей на основе обобщения и анализа обширной первичной инженерно-геологической информации;
- успешным использованием описанного в диссертации программного комплекса, выполняющего автоматизированный поиск поверхности смещения с минимальным коэффициентом устойчивости, на ~ 300 оползневых массивах: на участках трубопроводов «Голубой поток» (1997 г.), «Ямбург-Тула-I,II н.» (1999 г.), «Южно-Шапкинское месторождение - Харьяга» (1998 г.), склонах долин реки Волга у Саратовского НПЗ (1998 г.), при разработке проекта планировки микрорайона «Большие овраги» в г. Нижний Новгород (1998 – 1999 гг.), на склонах и откосах Казанского Кремля (1998 г.), Нижегородского Кремля (2007 г.), МГОМЗ «Коломенское» (2000 – 2009 и 2016 гг.),

ООПТ «Воробьевы горы» (2003, 2014, 2017 гг.), на участке 3-го ТК вблизи Андреевского моста (1999 г.), для оценки устойчивости и выработки проектных решений при устройстве горнолыжных комплексов на ул. Воронежской, Шипиловской и на Рублевском шоссе в г. Москва (2003–2005 гг.), для оценки устойчивости и фильтрационной прочности ограждающих дамб шламонакопителей «Белое море» ОАО «Сода» в Башкирии (2009 г.), на оползнеопасных склонах вблизи производственной, научно-исследовательской и жилой застройки в городах Москва, Владимир, Калуга, Иваново, Нижний Новгород, Смоленск, Якутск, Химки, Клин, Железнодорожный, а также в Чувашии, Мордовии, Ивановской, Московской, Магаданской и Нижегородской областях и др. (1993 – 2016 гг.);

- совпадением результатов выполненных расчетов с фактически наблюдаемыми (с использованием геодезических и инклинометрических измерений) деформациями на рассмотренном в диссертации оползневом участке к востоку от метромоста Воробьевых гор;
- прогнозировавшимся на основе расчетов устойчивости с использованием вышеуказанных программ и вскоре произошедшим возникновением оползневой массы вблизи фуникулера Воробьевых гор.

Апробация работы. Основные результаты настоящей работы были представлены автором на конференциях:

1. «Проблемы инженерной геологии» – Научно-методическая конференция, посвященная 85-летию В.Д. Ломтадзе, СПбГГИ (1997)
2. «Современные технологии изысканий, проектирования и геоинформационного обеспечения в промышленном, гражданском и транспортном строительстве» (2000)
3. «Сергеевские чтения» (2001)
4. «Новые идеи в науках о Земле» МГГА (2001)
5. «Юбилейная конференция, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Г.С. Золотарева (1914 – 2006)» МГУ (2014)
6. «VII научные чтения Н.Я. Денисова» МГСУ (2014)
7. На заседании секции «Инженерной геологии» МОИП (25 февраля 2016)

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений, общий объем ее 145 страниц. Она содержит 13 таблиц (не считая приложений), 41 рисунок, а также список использованных литературных и фондовых источников из 133 наименований.

Автор выражает благодарность за предоставленные материалы И.В. Володиной, Н.С. Громовой, Э.В. Калинину, С.Д. Пигариной, А.В. Тихонову, А.А. Школину. Автор благодарен научному руководителю Э.В. Калинину за возможность обсуждения текста и научных

положений диссертации, а также Е.Н. Огородниковой, С.Н. Чернышеву, В.П. Хоменко за высказанные советы и соображения.

Введение

В диссертации рассмотрены крупные блоковые оползни Москвы и Подмосковья (развитые также в ряде других районов центральной России), смещение которых связано с верхнеюрскими глинами.

Оползневые явления, связанные с юрскими глинистыми отложениями Москвы и Подмосковья, известные издавна, впервые в 1908 г. были исследованы на участке Воробьевых гор А.В. Павловым (1869-1947 гг.). Впоследствии блоковые оползни Московского региона изучались Б.М. Даньшиным, М.В. Чуриновым, И.С. Рогозиным, Ф.В. Котловым, В.В. Кюнтцелем, К.А. Гулакиным, Е.П. Емельяновой, М.Н. Парецкой, Г.П. Постоевым, С.Д. Пигариной. В последние годы методике изучения, механизму и закономерностям развития этих оползней были посвящены кандидатские диссертации А.В. Тихонова (2011) и А.И. Казеева (2012). Критический анализ выполненных исследований, однако, показывает необходимость определения реального механизма развития этих оползней, которые большинством исследователей относились по механизму к оползням выдавливания.

В работе использовано следующее определение оползней выдавливания (сжатия-раздавливания): это оползни, происходящие в результате гравитационного раздавливания значительных объемов грунтов ОДГ с разрушением первоначальной структуры. Дальнейшие деформации происходят в форме вязкопластического выдавливания этих *разрушенных* грунтов в сторону базиса оползания.

Вопреки представлениям о раздавливании значительных слоев верхнеюрских грунтов, практически во всех колонках глубоких скважин на оползневых участках отмечаются, как максимум, лишь маломощные (менее 1 – 1,5 м) зоны нарушенных грунтов, да и то в большинстве случаев не перемятых, а с «зеркалами скольжения».

Результаты режимных наблюдений за смещениями грунтовых реперов и деформациями в наблюдательных скважинах (инклинометрия), а также данные геофизических исследований и визуального обследования показывают, что в ряде случаев основному оползневому смещению предшествует смещение (отползание) наиболее близких к реке оползневых блоков, в ряде случаев в средней части существующего оползневого тела фиксируются участки напряжений растяжения и непосредственно трещины растяжения вместо вала сжатия-выпора.

В расчетах устойчивости, исходящих из гипотезы сжатия-раздавливания, полностью отсутствует учет длины оползневого склона (по направлению смещения) и, соответственно, его генеральной крутизны. Кроме того, отсутствует какой-либо учет прочности всех грунтов, кроме

грунтов основного деформируемого горизонта (ОДГ), в роли которого в Московском регионе в большинстве случаев выступают глины оксфорда. Между тем выше них зона смещения проходит в грунтах на протяжении 25–100 м по длине. Лишь небольшая часть этой длины может быть ослаблена трещиной растяжения.

Требуют пересмотра также методы оценки опасности и прогноза развития подобных оползней и возможные защитные мероприятия. Кроме того, в предлагаемых ранее защитных мероприятиях экологический аспект до сего времени вообще практически не учитывался.

Основным способом данного исследования было математическое моделирование оползневых массивов с использованием автоматизированного поиска наиболее опасной зоны смещения. На первом этапе для выполнения расчетов устойчивости использовалась обобщенная геомеханическая модель, все исходные параметры которой: рельеф склона, схематизированное геологическое строение массива, положение уровня грунтовых вод и физико-механические свойства грунтов, задавались **строго осредненными** на основе данных ООО НПП «Сингеос» и ряда других организаций (литературных и фондовых источников) по крупным блоковым оползням Москвы и Подмосковья.

Данный способ исследования выбран по 2 причинам:

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

Затем на основе общих полученных закономерностей была выполнена оценка устойчивости конкретного, весьма важного, детально изученного оползневого участка подобного типа в районе Метромоста Воробьевых гор г. Москва (глава 4). Полученный при этом результат полностью согласуется с данными режимных геодезических и инклинометрических наблюдений, что обеспечивает дополнительную доказательность выводов диссертации в целом.

Использованные программные средства

На сегодня для большинства задач в области расчетов устойчивости склонов и откосов при реально существующей обеспеченности данными о строении массива, свойствах грунтов, гидрогеологических условиях и т.д., в качестве метода оптимальной сложности можно принять двухмерные расчеты устойчивости с использованием алгоритмов поиска поверхности смещения с минимальным коэффициентом устойчивости (при этом для оценки величин различных «дооползневых» деформаций численные методы – МКЭ, МКР и т.д. – являются незаменимыми).

Одной из программ, включающих эти алгоритмы, является программа «PSK» в различных версиях, разработанная ООО «НПП «Сингеос» и с 1992 г. использовавшегося примерно на 65-70 объектах в России (около 300 оползневых массивов) и использованная в данной работе. По точности и реалистичности получаемых результатов программы «PSK» как минимум не уступают зарубежным программам подобного назначения, появившимся позднее.

Программа обеспечивает автоматизированный поиск наиболее опасной поверхности возможного или реального смещения оползня, т.е. поверхности скольжения (сдвига), дающей минимальный коэффициент устойчивости склона. Алгоритм поиска позволяет анализировать поверхность любой формы без ограничений на количество точек перегиба. Начальные и конечные точки оползневого тела могут задаваться (например, при наличии трещин закола или четко выраженного языка оползня, а также при обратных расчетах), как и отдельные точки в массиве, где предполагается (или обнаружена) зона смещения.

В основе блока 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 граням расчетных отсеков. Учитывается весь основной набор сил, воздействующих на блок, и направления их приложения.

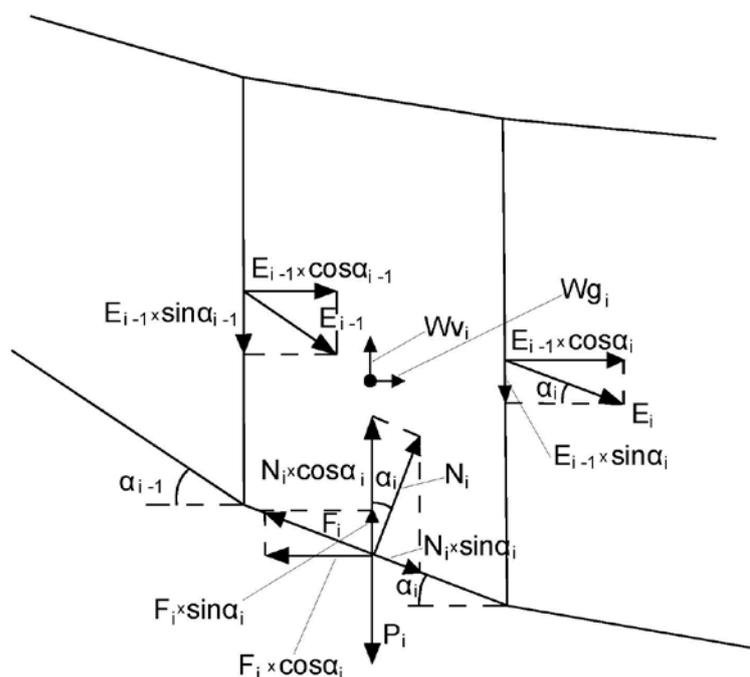


Рис. 1. Схема сил, действующих на отсек

Пара уравнений для i -го блока имеет следующий вид:

- горизонтальные силы: $N_i \sin \alpha_i + E_{i-1} \cos \alpha_{i-1} - E_i \cos \alpha_i + Wg_i = F_i \cos \alpha_i / K_y$,
- вертикальные силы: $P_i - N_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin \alpha_{i-1} - E_i \sin \alpha_i - Wv_i = F_i \sin \alpha_i / K_y$

Коэффициент устойчивости на каждом «шаге» поиска рассчитывается итерационным

методом путем решения системы уравнений равновесия горизонтальных и вертикальных сил для блоков плоской модели склона.

Кроме коэффициента устойчивости и положения поверхности потенциального смещения, рассчитывается и усилие взаимодействия (сжатия, растяжения) по границам условных блоков. Программа производит автоматическое разбиение склона на блоки заданной длины, разбиение регулируется по высоте и по профилю в широких пределах.

При наличии лишь данных консолидированно-дренированных испытаний, для учета величин порового давления в слоях ниже УГВ вычисляется «эффективный угол внутреннего трения» ($\varphi_{эф}$):

$$tg\varphi_{эф} * \sigma_{\text{ТОТ}} = tg\varphi * (\sigma_{\text{ТОТ}} - Н)$$

где $\sigma_{\text{ТОТ}}$ – тотальные напряжения от веса водонасыщенных (включая содержащуюся в грунте воду) и неводонасыщенных грунтов в точке ПС, являющейся средней по длине прохождения ПС в оцениваемом слое (РГЭ), Н – напор в данной точке.

Разработанный программный комплекс (со второй половины 1990-х годов включивший разработанные нами программы трехмерных и вероятностных расчетов устойчивости) позволяет существенно повысить точность оценки устойчивости в сравнении с традиционными инженерными методами расчета:

- в силу более точного учета возникающих в массиве склона внутренних напряжений;
- за счет поиска и определения действительно опаснейшей поверхности (в реальности, естественно, представляющей собой зону) потенциального смещения (ППС);
- за счет эффекта «сглаживания» ППС (как правило, используется несколько десятков расчетных блоков).

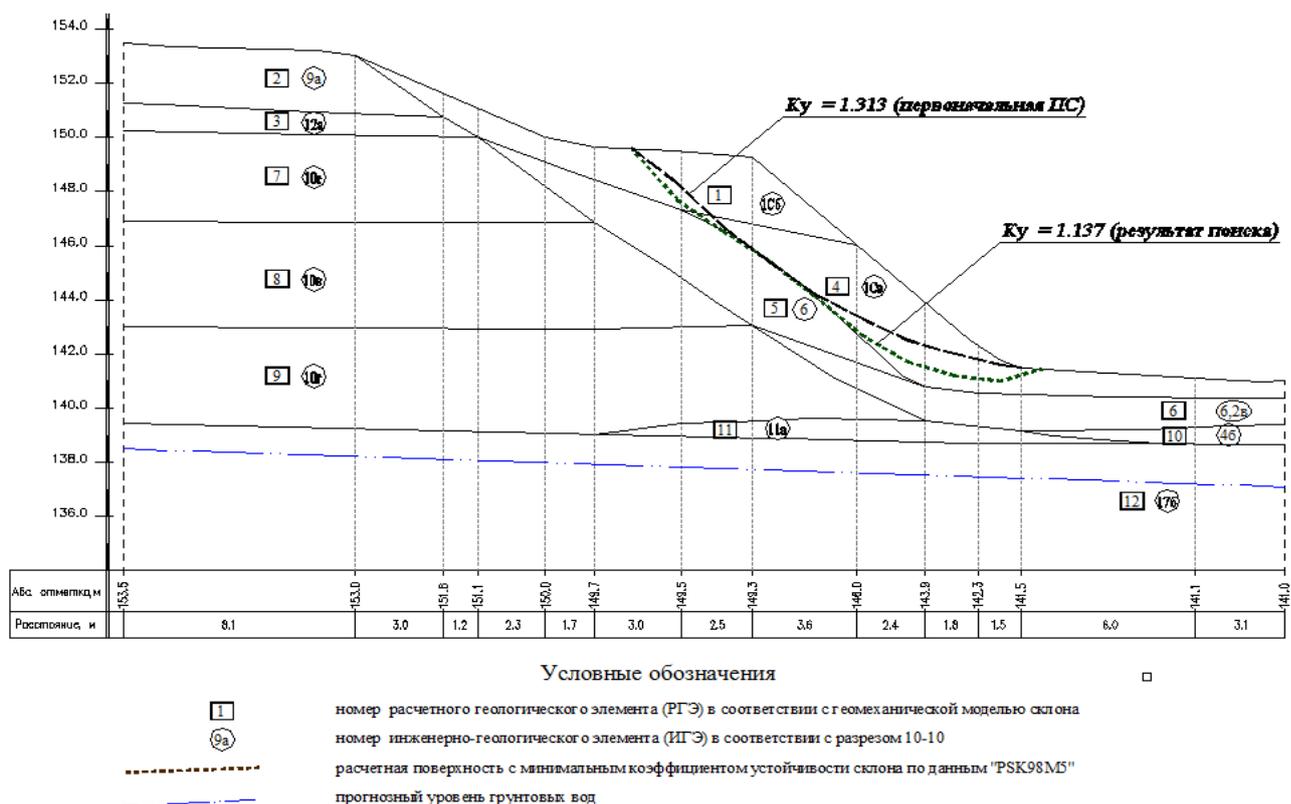


Рис. 2. Результаты расчета устойчивости по линии разреза 10-10 (Коломенское). Использование функции поиска положения опаснейшей зоны смещения позволяет найти положение зоны с заметно меньшим коэффициентом устойчивости, чем при «интуитивном» задании ее положения

Многочисленными расчетами подтверждено, что даже незначительные (на величину 1–3%, а некоторых случаях и менее 1% от мощности оползневого тела) отклонения прохождения поверхности смещения от ее опаснейшего положения увеличивают коэффициент устойчивости на 5 – 20 %.

Неоднократно проводилось сопоставление расчетов устойчивости с традиционными методами – естественно, при *предварительно найденном* с помощью программ «PSK» положении опаснейшей поверхности потенциального смещения. Так, сопоставление, выполненное в 2015 г. для склона у Нижегородского Кремля, дало следующие результаты: коэффициент устойчивости по «PSK» – 0,97, по методу Бишопа – 0,886, по Morgenштерну-Прайсу – 1,056, по Ямбу – 0,967, среднее из 3-х последних – 0,97.

Автором также проведено сравнение результатов расчетов устойчивости для нескольких программ, использующих алгоритмы минимизации K_u (рис. 3). Из приведенных данных видно, что у программ, использующих круглоцилиндрическую поверхность смещения (ПС), даже поиск ПС с минимальным коэффициентом устойчивости не дает возможности найти реальную критическую ПС, и найденные минимальные коэффициенты устойчивости оказываются завышенными на 13–17 %. У программ, реализующих поверхность смещения произвольной

формы, минимальные коэффициенты устойчивости ниже и близки между собой, при этом, хотя найденный программой «GeoStab 2016» коэффициент устойчивости $K_y = 0,99$ на 3 – 4 % ниже, чем найденный программой «PSK», сама форма поверхности смещения выглядит более угловато и менее реалистично.

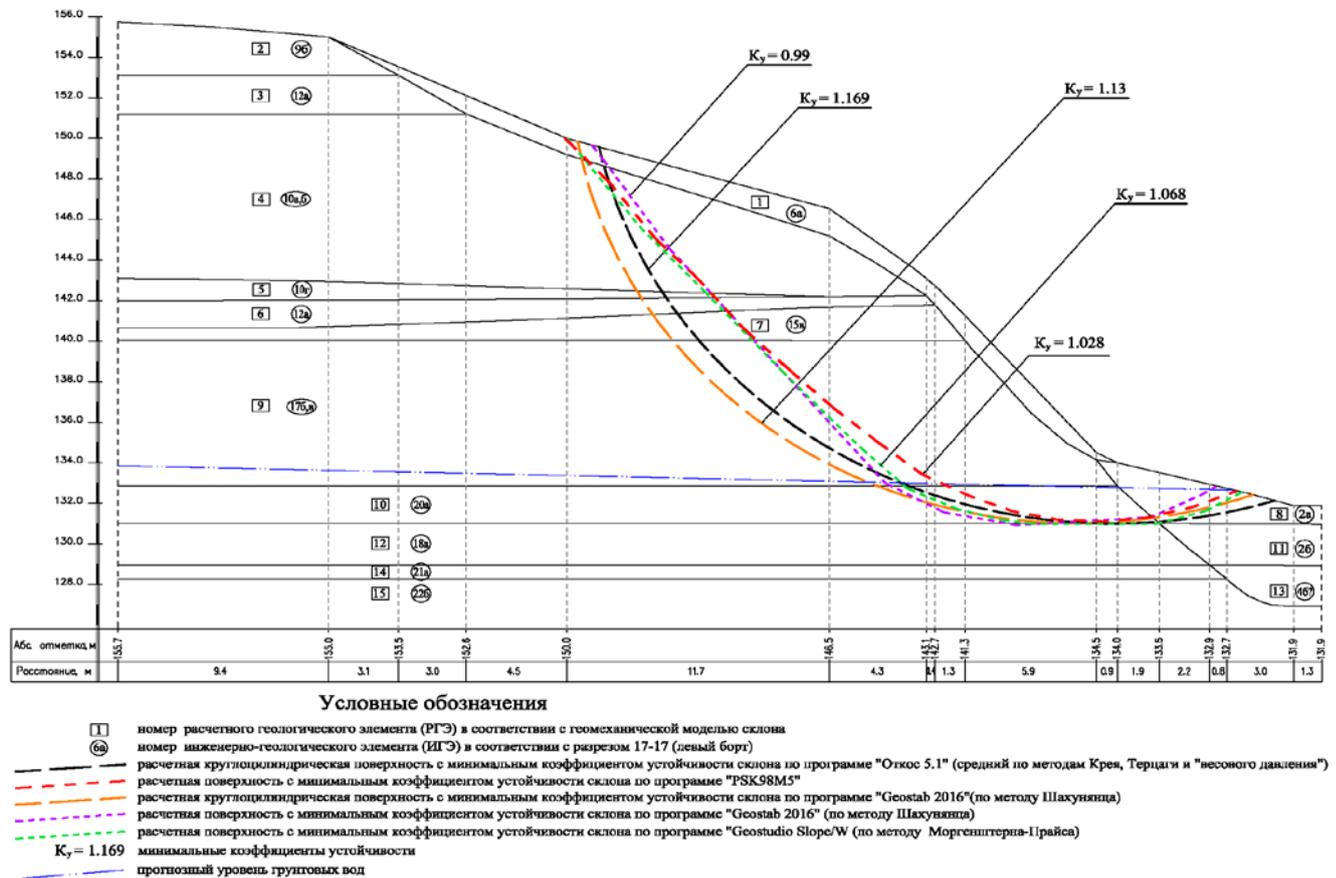


Рис. 3. Сравнение результатов расчетов устойчивости по различным программам с использованием алгоритмов минимизации K_y

Расчеты с использованием созданных с участием автора программ «PSK», базируясь на принципах предельного равновесия, обеспечивают определение минимального коэффициента устойчивости и формы потенциальной поверхности смещения, которые оказываются весьма близкими к получаемым при использовании численных методов (МКЭ, МКР и т.д.) (рис. 4). Вышеуказанные возможности позволяют надежно обосновать результаты компьютерного моделирования.

Таким образом, разработанные при непосредственном участии автора физические принципы, вошедшие в алгоритмы и компьютерные программы, реализующие функцию поиска поверхности (зоны) смещения с минимальным коэффициентом устойчивости позволяют существенно уточнить минимально возможные для данного массива коэффициенты устойчивости оползней сдвига, объемы потенциальных оползневых тел и глубину их подошвы, величины оползневых давлений, границы «зон безопасности» за бровкой.

По точности и реалистичности получаемых результатов программы «PSK» как минимум не уступают зарубежным программам подобного назначения, появившимся позднее.

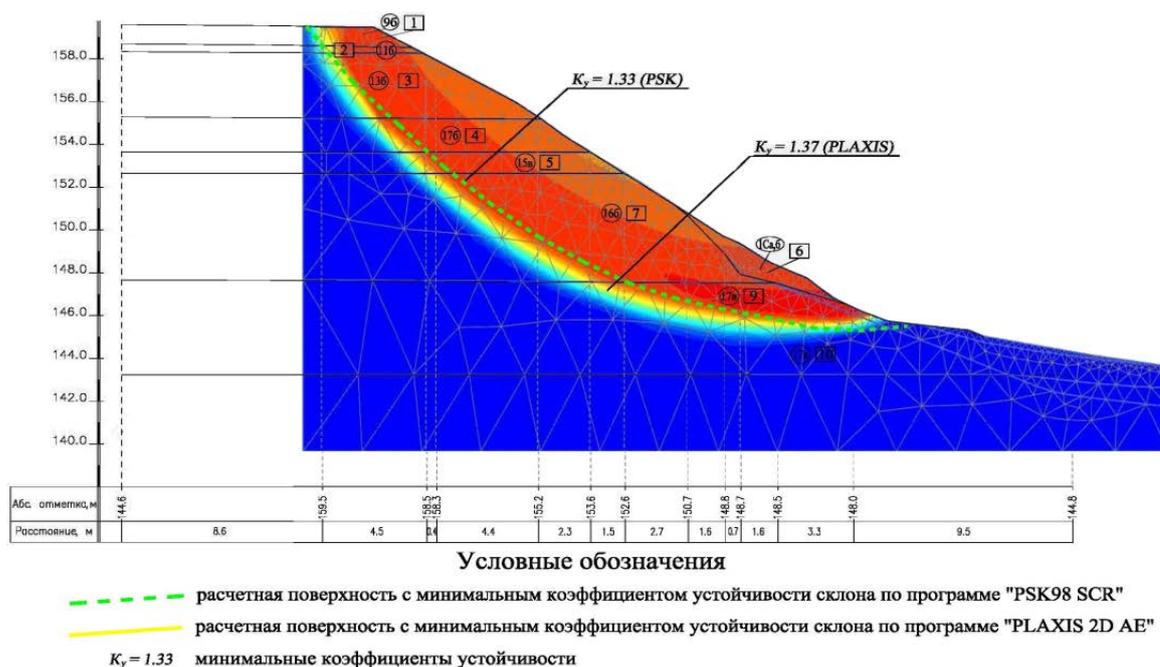


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов устойчивости по программам PSK и PLAXIS

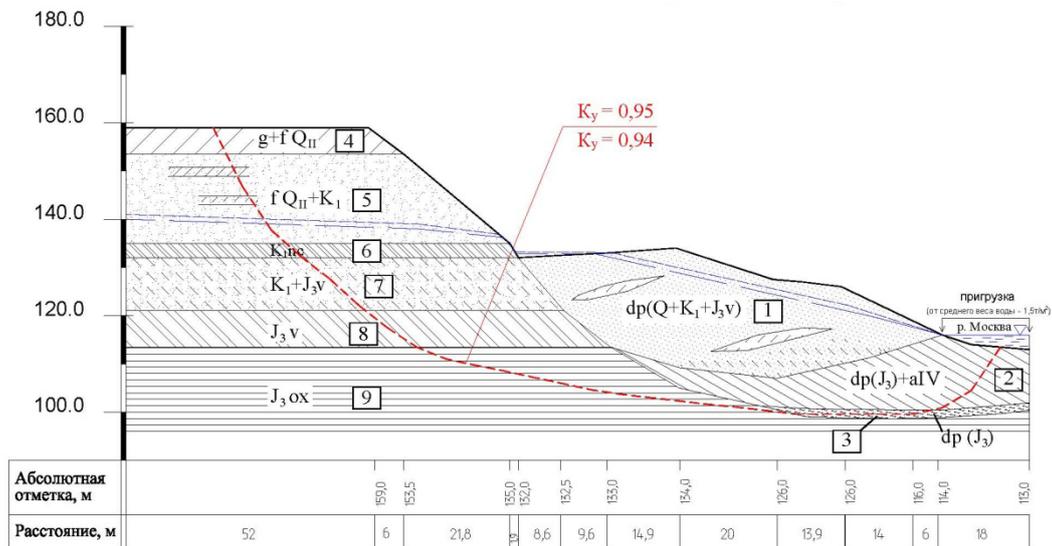
Изучение обобщенной геомеханической модели

Расчеты устойчивости выполнялись для нескольких, сменяющих друг друга, фаз развития склона, условно названных «этапами», в которых последовательно, в соответствии с развитием процесса, менялась морфометрия и геологический разрез склона, а также характеристики грунтов.

Использованные в расчетах характеристики грунтов задавались на основе их **нормативных** значений в соответствии с реально преобладающими литологическими типами, консистенцией и т.д., с учетом на воздействия порового давления в той или иной зоне массива.

На этапе I первоначально рассмотрено исходное положение, при котором предыдущий, сместившийся и нарушенный оползневой блок занимает сравнительно высокое положение, выдвинувшийся в реку «язык» частично размывает ее. Склон в целом при этом имеет коэффициент устойчивости 1,11.

На этапе II рассмотрена возможность основного смещения следующего оползневого цикла. Ширина формирующейся новой оползневой ступени, как и общая ширина оползневого склона от новой стенки срыва до уреза реки, соответствуют обобщенным по обширному материалу данным (рис. 5).



Условные обозначения

- 1 номер расчетного геологического элемента (РГЭ)
- уровень грунтовых вод: повышенный и средний
- $K_y = 0,95$ минимальный коэффициент устойчивости при возникновении глубинной ползучести (при C_w)
- $K_y = 0,94$ минимальный коэффициент устойчивости при развитии ползучести (при C_w)
- расчетная поверхность с минимальными коэффициентами устойчивости склона

Рис. 5. Этап II – возникновение и развитие глубинной ползучести

В глинистых грунтах юры и мела сдвиговые напряжения уверенно преодолевают как «структурное сцепление» (т. е. обеспечивается возможность возникновения ползучести), так и «сцепление связности» (в терминологии физико-технической теории ползучести Н.Н. Маслова), обеспечивая развитие ползучести. Коэффициенты устойчивости составляют 0,95 и 0,94 соответственно.

Полученные в расчетах значения K_y показывают достоверность возникающих оползневых деформаций не только в плоской постановке, но и в условиях реально трехмерных склоновых массивов для фронтальных оползней. Формирующаяся форма поверхности смещения (ПС) при этом в верхней части – классическая для оползней сдвига (срезания), в грубом приближении близка к круглоцилиндрической. Нижележащие блоки смещаются по ПС, унаследованной от предыдущих оползневых подвижек.

Расчеты, выполненные для этапа III, преследовали цель определить рельеф и общее строение массива на «момент остановки» – т.е. достижения оползневым телом нового состояния равновесия. Получена вертикальная амплитуда основного смещения 13–14 м. Дальнейшее смещение массива происходит в основном уже в режиме глубинной ползучести по мере размыва «языка» рекой.

Формы зон смещения, аналогичные полученной нами в ходе компьютерного моделирования, и противоестественные для какого-либо «раздавливания», установлены на оползневом участке в Коломенском вблизи Чертановского коллектора – как по данным

высокоточной скважинной инклинометрии, так и геодезическими методами (рис. 6).

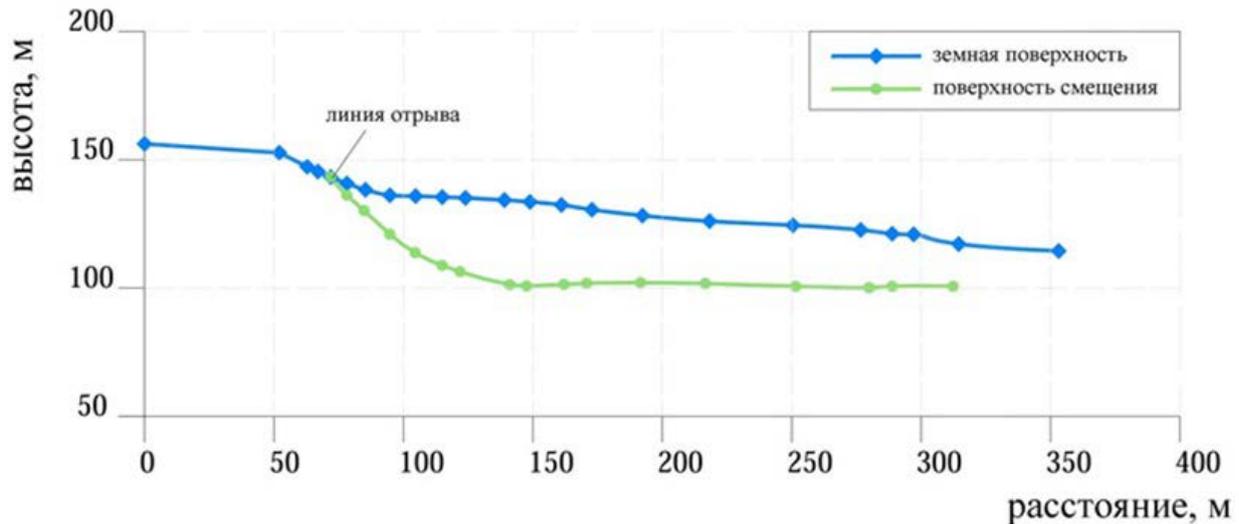


Рис. 6. Продольный профиль поверхности смещения Коломенского оползня вблизи Чертановского коллектора, рассчитанный на основе данных геодезического мониторинга.

Пересчитано при равных вертикальных и горизонтальных масштабах

В верхней части стенки срыва по мере смещения основного тела оползня вниз, формируется новая зона неустойчивости, в которой развиваются оползни второго порядка, зафиксированные при изысканиях.

Субгоризонтальные, порой значительные по размерам, поверхности у подножия стенок срыва подобных оползней, сформированы «однообразными» условиями стабилизации уже смещенных блоков, а не критическим состоянием непосредственно перед следующей оползневой фазой, а также последующим заполнением оползневых западин продуктами делювиально-пролювиального смыва и грунтом мелких вторичных оползней, а на Воробьевых горах – и техногенной планировкой.

Прочностные и деформационные характеристики верхнеюрских глинистых грунтов Москвы и Подмосковья вполне сравнимы с этими характеристиками четвертично-меловой толщи, не отличаются первые и исключительной пластичностью, что, в принципе, не создает условий для какого-либо «выдавливания».

Весьма обширные данные бурения на оползневых участках практически единообразно подтверждают отсутствие какого-либо раздавливания и разрушения структуры пород ОДГ. Зоны смещения, в том числе подтвержденные данными инклинометрических наблюдений, либо вообще плохо фиксируются в кернах, либо представляют собой слои глин нарушенной структуры, мощностью, как правило, не превышающей 1 м.

Полученные на разных оползневых участках данные лабораторных исследований показывают, что как плотность, так и сопротивление сдвигу смещенных (оползающих) и

коренных нижнемеловых и верхнеюрских глинистых грунтов практически одинаковы (вне узких зон сдвига, естественно). Различия в средней плотности, как правило, не превышают 2%, различия сопротивления сдвигу преимущественно не превосходят 5%, причем в обоих случаях различия фиксируются как в ту, так и в другую сторону. Это подтверждает, что нарушения структуры грунтов при оползании нет, т.е. смещение происходит едиными крупными блоками. Местами они раскалываются уже в процессе смещения субпараллельно и субперпендикулярно бровке на несколько также достаточно крупных блоков.

Таким образом, выполненное компьютерное моделирование, а также анализ иных инженерно-геологических материалов, показывают реальность возникновения и развития глубоких блоковых оползней Московского региона по механизму сдвига. В их развитии решающую роль играют деформации залегающего в основании склона глинистого слоя, склонного к деформациям ползучести. Последние обеспечивают, во-первых, частичную «подготовку» зон будущего основного смещения, во-вторых, длительное протекание «пост-основного» смещения. Так называемый «вал выдавливания» фактически является результатом проворота нижнего (переднего) блока, в ряде случаев повернутого в субвертикальное положение, т.е. почти на 90° к первоначальному залеганию.

У подобных оползней головная часть смещает перед собой зачастую протяженный «язык» оползня, так как смещение по субгоризонтальной зоне сдвига сильно облегчено, причем сопротивление сдвигу там, в первую очередь, характеризуется низкими значениями угла внутреннего трения. Низкое внутреннее трение возникает вследствие того, что основная часть зоны смещения у подобных оползней наследует уже «разработанную» зону предыдущих оползневых подвижек, сформированную при регрессионном развитии оползневого склона. Свою роль играет и наличие в зоне смещения значительных поровых давлений.

Оценка устойчивости оползневого массива в районе метромоста Воробьевых гор

В главе 4 рассматривается угроза смещения крупного блокового оползня в районе комбинированного (автомагистраль и линия Метрополитена) моста через Москву-реку. Опоры Метромоста выполнены с опиранием на оползневой массив (рис. 7).

Известняки (C₂), перекрываются мощной толщей верхнеюрских глин (J₃cl-ox), на которых залегают суглинки и глины кимериджского яруса (J₃km) и пески и алевроиты с прослоями суглинков титона – нижнего мела (J₃tt+K₁). Венчают разрез четвертичные отложения – моренные и покровные суглинки и флювиогляциальные суглинки и пески. Высота бровки склона над нынешним уровнем воды в Москве-реке 54 м. Массив, за исключением верхних 20 – 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.

Геодезические наблюдения, проводившиеся на Воробьевых горах 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.

В 1959–1962 гг. здесь были осуществлены противооползневые мероприятия: отсыпка контрбанкета, устройство набережной, поверхностный дренаж. Последующие режимные геодезические наблюдения показали, что после осуществления противооползневых мероприятий смещение глубоких оползней замедлилось, но не прекратилось, особенно в нижней по течению от Метромоста части склона.

По данным режимных наблюдений последнего времени (2008–2015 гг.), зона горизонтальных смещений поверхностных реперов (заглублённых ниже слоя промерзания) простирается на расстояние до 80 м за бровкой «плато» (рис. 7, 8). Суммарная величина смещений – около 100 мм за 7 лет наблюдений при точности измерений около 2 мм.

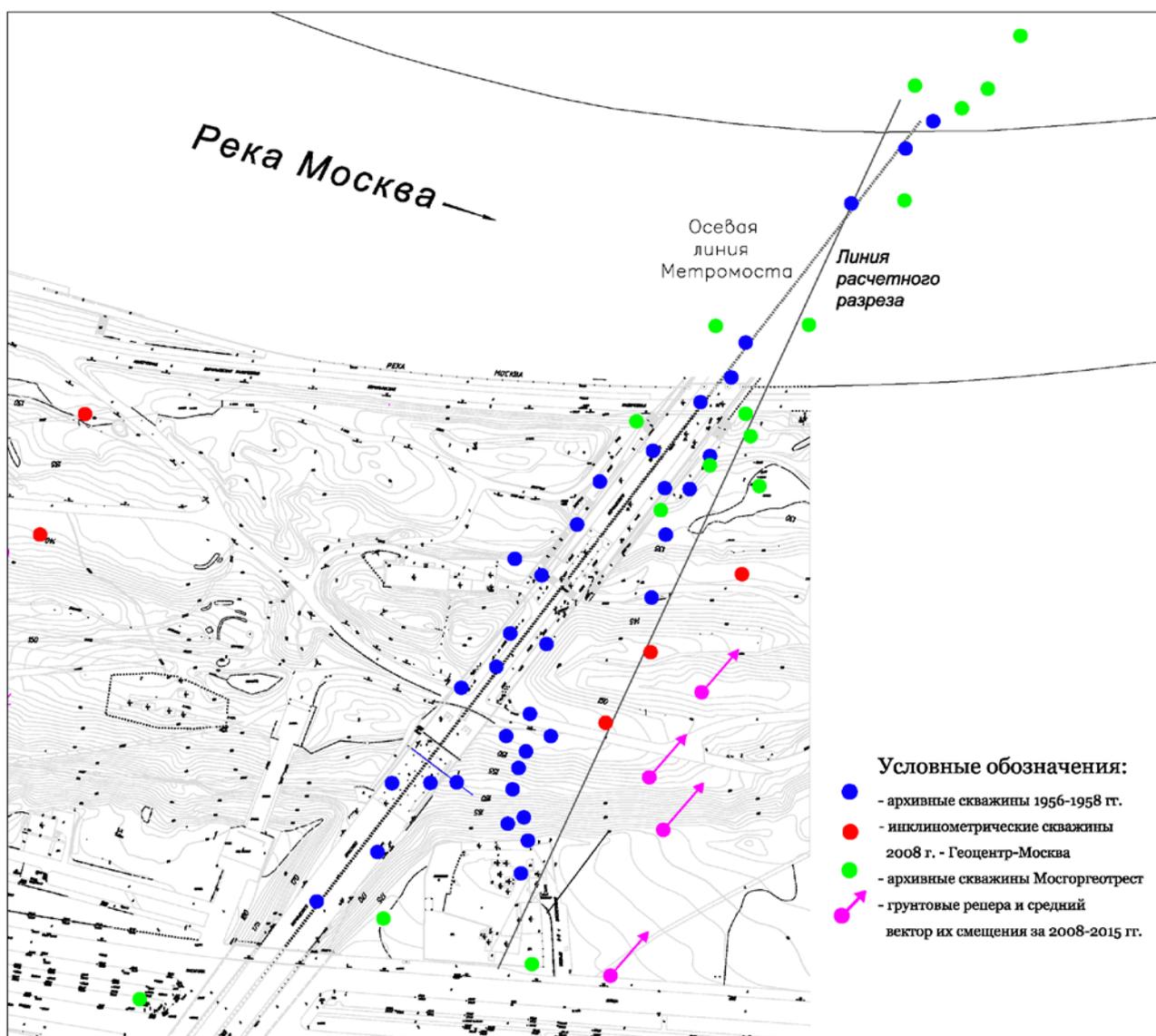


Рис. 7. Схема фактического материала

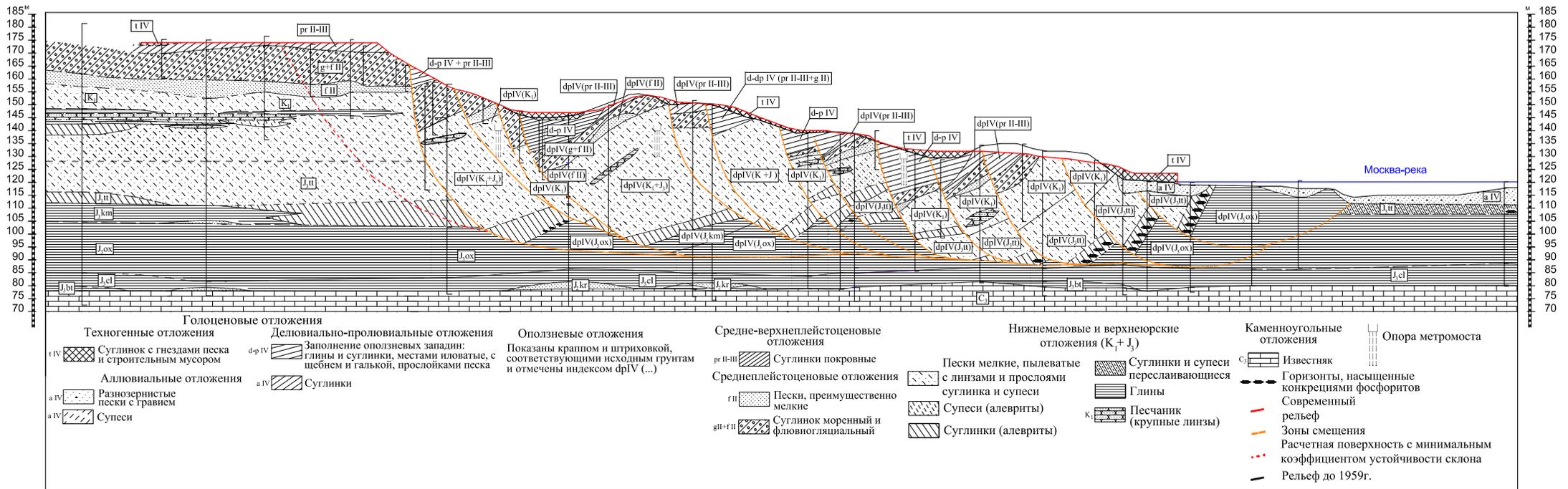


Рис. 8. Инженерно-геологический разрез восточнее Метромоста

Вертикальные смещения реперов незначительны и составляют около 1/20 от горизонтальных.

Графики инклинометрических наблюдений за последние 7 лет и более длительных (около 60 лет) наблюдений за поверхностными реперами показывают, что в массиве в настоящее время реализуются деформации двух видов:

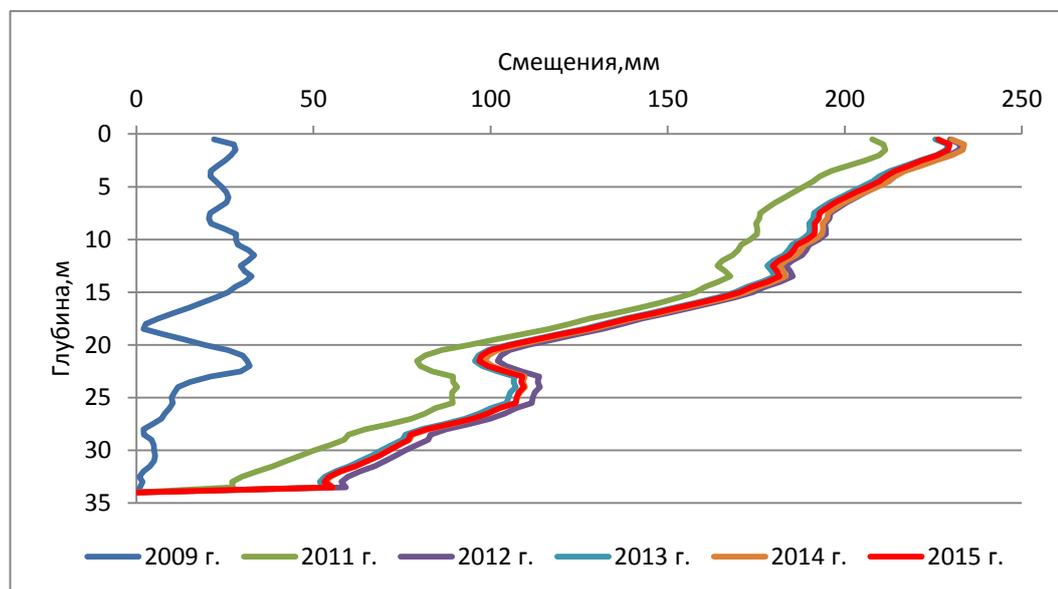


Рис. 9. Полное смещение профиля скважины V-II (в 2011 г. перегиб обсадных труб на гл. 34 м)

– периодическое «проскальзывание» блоков тела существующего оползня по узким (малой мощности) зонам смещения, после чего возможны многолетние перерывы в подобных деформациях;

– постепенное «перекашивание» всего массива как целого, включая участок плато за бровкой, при котором величины смещения нарастают к поверхности. Эти деформации непрерывны, хотя скорость их колеблется.

Расчетная геомеханическая модель включает 10 расчетных грунтовых элементов (РГЭ). При этом проанализированы свойства грунтов, полученные рядом организаций на этом и соседних участках, для уточнения свойств грунтов зоны смещения выполнены обратные расчеты. Прямые расчеты устойчивости показали, во-первых, неэффективность выполненной ранее планировки склона, во-вторых подтвердили нахождение склона в стадии незатухающей ползучести ($K_y \approx 0,91$ в 2D расчетах). Ширина потенциального блока по расчетам весьма близка к наиболее вероятной ширине при данной высоте склона по обобщающей формуле В.В. Кюнтцеля.

Различные методы оценки периода ползучести показали его возможную продолжительность от 300 до 1250 лет, причем основная часть его уже прошла.

Развитие быстрого и значительного по величине «основного» смещения в самое ближайшее время маловероятно. Оползневой же риск, рассчитанный на более длительный (10 –

20 и более лет) период, весьма высок, учитывая стоимость и ответственность Метростоя. Предложен минимально необходимый комплекс работ по мониторингу деформаций и гидрогеологической ситуации на склоне и присклоновом массиве и ряд конкретных мероприятий противооползневой защиты.

Прогнозирование и защитные мероприятия

Ключевыми моментами в прогнозировании и защите от блоковых оползней Московского региона являются:

- длительный срок подготовки основного смещения, проходящий в фазе глубинной ползучести, обычно ускоряющейся перед основным смещением;
- крупноблоковый характер оползней, в сочетании со значительной их мощностью, делает сложной их стабилизацию продольными (субпараллельными бровке) рядами удерживающих свай, зато открывает возможность создания пространственной противооползневой защиты с использованием внутренней прочности блоков (в направлении смещения она довольно высокая); пространственная защита, с использованием принципа контрфорсов, может быть гравитационного типа (участки «контрбанкетов», в том числе декоративно оформленных) или выполняться в виде свайных групп.
- устойчивость массива постоянно близка к предельной, но свойства грунтов до основного смещения резко не изменяются, что дает возможность стабилизировать ситуацию, повысив коэффициент устойчивости лишь на 7-10%;
- в развитии и ускорении смещений значительна роль гидрогеологического фактора, в первую очередь напоров и поровых давлений, что позволяет при проведении эффективных дренажных мероприятий, на нужных участках в плане и по глубине, замедлить деформации, и таким образом, сильно отдалить, или даже полностью исключить, основное смещение потенциально опасных блоков.

Возможна поэтапная методика их изучения:

- предварительная оценка оползнеопасности участка на основе: инженерно-геологических аналогий и региональных закономерностей, с использованием морфометрических признаков (высоты и крутизны склона, положения ОДГ, величины реализованных оползневых смещений, степени заполнения тыловых западин), результатов оползневой съемки, бурения, предварительных расчетов устойчивости с использованием программ, осуществляющих поиск поверхностей смещения произвольной формы с минимальным коэффициентом устойчивости, дающих, в частности, ориентировочное положение зон смещения;

– уточнение оползневого риска и обеспечение проектирования защитных мероприятий на основе: инструментальных долгосрочных наблюдений за поверхностными и глубинными реперами (инклинометрия), детального бурения и зондирования, обеспечивающего уточнение положения зон смещения и границ оползневых блоков, лабораторных испытаний грунтов на ползучесть, уточнения фильтрационных свойств грунтов, выполнения расчетов устойчивости и деформаций с учетом поровых давлений и процессов ползучести, с обязательным сопоставлением их результатов с данными режимных наблюдений, оценки возможной продолжительности наблюдаемых деформаций и вероятности катастрофической активизации;

При обнаружении признаков приближающейся активизации (ускорение смещений глубинных и поверхностных реперов, повышение УПВ и т.д.) необходимо их тщательно проанализировать. Для оценки времени до разрушения склона возможно использование логарифмической зависимости М. Сайто, с подстановкой в нее (взамен относительной) абсолютной скорости деформирования: $\log T_p = 2,33 - 0,916 * \log V \pm 0,59$.

Для блоковых оползней Московского региона большие величины реализованных в последнем оползневом цикле смещений, большая степень (80 – 90 %) заполнения оползневых западин делювиально-пролювиальными отложениями, как и другие признаки, говорят о приближении основного смещения следующего цикла, что обуславливает значительный риск.

В последние 20 – 25 лет предложения по предотвращению или стабилизации этих оползней разрабатывались рядом специалистов: Г.П. Постоевым (институт Геоэкологии РАН), М.С. Орловым (МГУ), А.Б. Мещанским, И.В. Колыбиным и др. (НИИОСП, 2001). Все предложенные ранее мероприятия, однако, либо ведут к фактической активизации оползневого процесса, либо непригодны по экономическим и инженерно-строительным (чрезвычайная сложность или невозможность реализации, огромные и «вечные» расходы на эксплуатацию), и (или) геоэкологическим причинам (резкое сужение русла Москвы-реки, образование огромных депрессионных воронок, уничтожение родников и ручьев, деградация биоценозов, резкое обеднение растительных сообществ, уничтожение ценных рекреационных ландшафтов, практическое исключение из хозяйственного использования значительных земельных участков на плато у бровки).

Для крупных блоковых оползней Москвы и Подмосковья на основе их выявленного механизма предложен комплекс защитных мероприятий: предотвращение размыва языковой части оползня; самоизливающийся лучевой дренаж с бурением из оползневых западин; короткие сваи-шпонки, размещенные по глубине в районе зоны смещения и сваи обычного типа, в том числе подводные; контрбанкеты, в том числе контрфорсного типа; частичная разгрузка формирующихся блоков в «голове» оползня с помощью искусственных выемок, либо устройства подземного сооружения – в пределах зоны аэрации.

Эти мероприятия обеспечивают также минимальный экологический ущерб при их реализации за счет максимального сохранения природного ландшафта и минимального влияния на условия подземного стока, вследствие ограниченного по величине водопонижения и крайне слабого барражного эффекта при их осуществлении.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие научные и практические выводы.

1. Блоковые оползни Московского региона по механизму фактически являются оползнями сдвига (срезания). Их возникновение связано с формированием узкой зоны сдвига, а не с разрушением структуры грунтов в пределах значительных по мощности слоев массива в ходе их раздавливания, как это постулировалось ранее.

2. Механизм сдвига (срезания) при возникновении и развитии этих оползней подтвержден, в том числе, компьютерным моделированием с использованием вычислительной программы, позволяющей в автоматическом или полуавтоматическом режиме осуществлять поиск поверхностей (зон) смещения произвольной формы с минимальным коэффициентом устойчивости. Даже незначительные (на величину 1–4% от толщины оползневого тела) отклонения положения в массиве расчетной поверхности смещения от ее опаснейшего положения увеличивают коэффициент устойчивости на 5–20%. На основе поиска конфигурации поверхности смещения осуществляется также более точное, чем при интуитивном задании поверхности смещения, определение: размеров, глубины подошвы и объемов оползневых тел, границ «зон безопасности», величин оползневого давления. Программа обеспечивает определение минимального коэффициента устойчивости и формы потенциальной поверхности смещения, весьма близкие к получаемым при использовании численных методов (МКЭ, МКР и т.д.).

3. Ввиду того, что большинство крупных блоковых оползней Московского региона находится в состоянии, близком к предельному равновесию, для прогнозирования их развития и разработки защитных мероприятий могут быть использованы лишь программы, реализующие функцию поиска положения зоны смещения, при котором достигается минимальный K_y . Целесообразно комплексирование подобных расчетов с расчетами устойчивости до и после выполнения защитных мероприятий на основе метода конечных элементов. Учитывая фронтальность данных оползней, возможно ограничиться двухмерными расчетами устойчивости.

4. На основе представлений о сдвиговом механизме развития крупных оползней Московского региона и с учетом особенностей участков развития этих оползней, может быть

разработан комплекс защитных мероприятий, включающий в том числе частичное дренирование массива и полностью скрытые подземные и подводные удерживающие конструкции, что обеспечивает, в том числе, минимальный экологический ущерб.

5. Для более достоверных прогнозов возможности активизации подобных оползней целесообразны дальнейшие исследования, уточняющие историю развития этих оползневых склонов, возраст, периодичность и кинематику смещений, возможность влияния понижений и ослабленных зон в кровле каменноугольных известняков на возникновение и активизацию оползней.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском Государственном Университете им. М.В. Ломоносова:

1. Кропоткин М.П. Природа крупных оползней Москвы и Подмосковья // Инженерная геология. 2016. № 1. С. 4–14.
2. Кропоткин М.П. Оценка оползневой угрозы для метрополитана Воробьевых гор в Москве // Инженерная геология. 2016. № 3. С. 6–15.
3. Кропоткин М.П. Расчеты устойчивости склонов и откосов с использованием алгоритмов минимизации коэффициента устойчивости // Инженерные изыскания. 2017. № 1. С. 20 – 30.
4. Кропоткин М.П. О возрасте блоковых оползней Москвы – спустя полвека // Инженерная геология. 2017. № 1. С. 29 – 37.

Публикации в иных научных изданиях:

1. Кропоткин М.П. Повышение устойчивости замоченных лессовых склонов сейсмоопасных территорий/ Проблемы инженерной геологии и инженерной сейсмологии городов и урбанизированных территорий (г. Петропавловск-Камчатский, 1990 г.). Материалы научно-практического семинара. I том. М., 1990. С. 38-45.
2. Миронюк С.Г., Кропоткин М.П. Природные катастрофы в России и оценка риска / Безопасность и экология горных территорий. Тезисы докладов участников II Международной конференции (25-30 сентября 1995 г.), Владикавказ: Редакционно-издательское агентство Госкомиздата РСО-Алания, 1995. С. 104 – 105.
3. Корбутяк П.В., Кропоткин М.П. Методика решения объемной задачи расчета устойчивости склонов и откосов / Инженерно-геологическое обеспечение недропользования и охраны окружающей среды. Материалы международной научно-практической конференции. Пермь, 1997. С. 28 – 29.

4. Кропоткин М.П. Вероятностно-детерминированные расчеты устойчивости склонов и откосов / Материалы международной конференции «Анализ и оценка природных рисков в строительстве». М., 1997. С. 29 – 31.
5. Корбутяк П.В., Кропоткин М.П. Методика автоматизированных расчетов устойчивости склонов и откосов / Проблемы инженерной геологии. Материалы научно-методической конференции, посвященной 85-летию В.Д. Ломтадзе (11–12 ноября 1997 г.) / под ред. И.П. Иванова. СПб. 1998. С. 108 – 111.
6. Кропоткин М.П., Миронюк С.Г. Теория риска и проблемы устойчивого развития общества // Проблемы региональной экологии. 1999. № 3. С. 96 – 101.
7. Кропоткин М.П., Корбутяк П. В. Автоматизированные методы расчетов устойчивости склонов и откосов / Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного Совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. 2001. №3. С. 376 – 379.
8. Кропоткин М.П. Сопоставление компьютерных расчетов устойчивости с моделированием оползневых деформаций методом эквивалентных материалов / Новые идеи в науках о Земле: тезисы докл. 5-ой международной конференции. М.: МГГА. 2001. Т. 4. С. 73.
9. Кропоткин М.П. Оползни выдавливания – истинные и мнимые / Современные проблемы инженерной геодинамики: Труды Юбилейной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Г.С. Золоторева (1914–2006) (Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 29–30 сентября 2014 г.) / под ред. Э.В. Калинина, О.В. Зеркаля. – М.: Издательство Московского университета. 2014. С. 93 – 97.
10. Кропоткин М.П. Геоэкологическая оценка блоковых оползней Московского региона // Разведка и охрана недр. 2017. № 6. С. 55 – 62.