



ОПОЛЗНИ И ПРОВАЛЫ В КАРСТОВОЙ СРЕДЕ В РАЙОНЕ РЕКИ УФЫ

Н.А. ОРЛОВА

ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук»
13, Уланский пер., г. Москва 101000, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В результате рекогносцировочных маршрутов и инженерно-геологических изысканий получены данные о характере развития экзогенных процессов на участке, примыкающем к г. Уфа. Этот регион хорошо изучен благодаря широкому развитию карста. Оползни получили меньшую распространенность, но их развитие часто связано с активизацией карста. Оползни, формирующиеся в провалах и понижениях в рельефе, широко развиты и в других регионах Российской Федерации.

Цель. Изучение особенности формирования оползней. Выполнение анализа последовательности механизма образования оползней, приуроченных к зонам разуплотнения горного массива.

Материалы и методы. В данном исследовании предложен механизм оползневых явлений в местах развития карста. Работа основана на анализе результатов предыдущих исследований в 1997, 2013 и 2017 гг., дешифрировании спутниковых снимков, цифровой модели рельефа и топографических, геоморфологических, инженерно-геологических карт, рекогносцировочных исследований. Особенность инженерно-геологических условий выбранной территории позволяет изучить формирование и развитие одновременно двух экзогенных процессов (карст и оползни).

Территория изучения: участок выезда из г. Уфа вдоль склонов рек Солотча и Уфа. На основе закона, установленного Бондарик, Пендин, Ярм в 2007 г.: «...одни геологические процессы, подготавливают другие, те, в свою очередь, — третьи и т.п. и вследствие этого развиваются так называемые каскадные процессы...» Рассмотрены экзогенные геологические процессы — карст и оползни, протекающие на одном участке геологического массива.

Результаты. Формирование полостей приурочено к тектонической трещиноватости, по которой поверхностные и подземные воды протекают вглубь горного массива. Со временем происходит изменение гидродинамической зональности, вынос заполнителя и освобождение ранее сформировавшихся трещин, полостей и пустот. Деформация массива над полостью не происходит до тех пор, пока сохраняется вертикальное давление в грунтах и несущая способность слоя.

В результате представлена на рассмотрение последовательность протекания процессов, выдвинуто предположение, что трещина бортового отпора деформирует поверхность склона после сформированного блока на глубине.

Заключение. Показано, что при формировании карстовых провалов происходит активизация оползневых процессов на поверхности склона.

Ключевые слова: провал, воронка, карст, оползни, поверхность скольжения, мониторинг

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Благодарности: автор благодарит Г.П. Постоева, М.В. Леоненко, В.П. Хоменко.

Для цитирования: Орлова Н.А. Оползни и провалы в карстовой среде в районе реки Уфы. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2022;64(3):85—93.
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-3-85-93>

Статья поступила в редакцию 15.07.2022
Принята к публикации 08.09.2022
Опубликована 17.10.2022

LANDSLIDES AND SINKHOLES OF THE KARST ENVIRONMENT IN THE VICINITY OF THE UFA RIVER

NADEZHDA A. ORLOVA

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS
13/2 Ulansky lane, Moscow 101000, Russia*

ABSTRACT

Introduction. As a result of the conducted route reconnaissance and geological engineering surveys, data about the development pattern of exogenous processes at a site adjoining the city of Ufa were obtained. This region is well studied due to the extensively developed karst. Although landslides are less prevalent here, their development is frequently connected with the karst intensification. Landslides, formed in sites of sinkholes and topographic lowering, are well represented in other regions of the Russian Federation.

Aim. To study the characteristics of landslide formation. In addition, the mechanism of forming landslides, confined to rock massif decompaction zones, is analysed.

Materials and methods. A mechanism of landslide formation in the sites of karst development is proposed. The work is based on the analysis of the results obtained in previous researchers of 1997, 2013 and 2017, interpretation of satellite images, digital terrain model and topographic, geomorphological and engineering-geological maps, as well as reconnaissance surveys. The peculiarity of engineering-geological conditions makes it possible to study the formation and development of two exogenous processes simultaneously (karst and landslides) in the selected area.

The area under study included the exit section of Ufa city along the slopes of the Solotchi and Ufa rivers. According to the law established by Bondarik, Pendin and Yarg in 2007, "...some geological processes prepare others, which, in turn prepare the next ones, etc. and, as a result, so-called cascade processes develop...". Exogenous geological processes of karst and landslides, developing in one section of the geological massif, are considered.

Results. The formation of cavities is confined to the tectonic fracturing, along whose surface underground waters flow into the depths of the rock massif. The hydrodynamic zonation varies in time with the subtraction of a filler and a release of previously formed cracks, cavities and voids. As long as the vertical pressure in soils and layer bearing capacity remain stable, no deformation of the massif above the cavity is observed. As a result of the study, the process sequence was presented for consideration, as well as the assumption was made about the lateral repulse crack deforming the slope surface after the formation of a block at the depth.

Conclusion. The formation of karst sinkholes was demonstrated to intensify landslide processes on the slope surface.

Keywords: sinkhole, funnel, karst, landslides, slip surface, monitoring

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

Acknowledgments: the author is grateful to G.P. Postoev, M.V. Leonenko, V.P. Homenko.

For citation: Orlova N.A. Landslides and sinkholes of the karst environment in the vicinity of the Ufa river. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(3):85—93. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-3-85-93>

Manuscript received 15 July 2022

Accepted 08 September 2022

Published 17 October 2022

Рассматриваемый в статье участок примыкает к границе Октябрьского и Советского районов (рис. 1), протягивается через реку Уфу и переходит в Кировский район, заканчиваясь трассой М-5. В результате рекогносцировочных и многолетних наблюдений [6, 7] установлено, что вдоль береговой линии рек Уфа и Солотча образуются оползни различной протяженности. Данные оползни нередко приурочены к местам формирования карстовых провалов. В целом для территории г. Уфа средний коэффициент закарстованности равен 0,002—0,003 (3,3 воронки на 1 км²), тем не менее на склонах он достигает 0,006—0,007, а на междуречье не превышает 0,0005. Поверхностные карстопроявления представлены главным образом воронками, часто провального генезиса. Диаметр их 10—90 м, иногда достигает 200 м, глубина от 5 до 40 м. В г. Уфа и окрестностях установлено 63 карстовых поля, в пределах которых плотность воронок от 10—20 до 100 на 1 км² и редко более. В пределах города и пригорода выявлено 27 карстовых полей.

Карбонатный и сульфатно-карбонатный карст связан с толщей шешминского и соликамского горизонтов, где карстующимися породами являются глина известковистая, мергели выветрелые, прослои сильнотрещиноватых известняков, в нижней части толща, как правило, загипсована.

Сульфатный карст приурочен к отдельным зонам и очагам, связанным с трещиноватостью, развит в кунгурском ярусе.

В процессе обрушения грунта в образующуюся полость и в случае формирования провала на поверхности на склоне начинает формироваться трещина закола. Подобные провалы подробно описаны в горном деле, их появление отмечают в бортах карьеров и откосах отвалов различные исследователи [2, 3, 9]. Дальнейшая активизация носит катастрофический характер, происходит образование одновременно двух процессов — карста и оползней.

Результаты и обсуждение

Геологическое строение исследуемого участка до глубины, способной повлиять на активизацию экзогенных процессов, представлено в основном четвертичной, неогеновой и пермской системами. Четвертичные отложения слагают долины рек и ручьев, тальвегов оврагов аллювиальными, делювиальными и пролювиальными образованиями, перекрыты техногенными и биогенными отложениями.

Неогеновая система представлена осадками кинельской свиты, сложена плотной серой глиной. Состав глин преимущественно монтмориллонитовый, содержит каолинит, гидрослюда, включения



Рис. 1. Положение площадки изысканий
Fig. 1. Survey site position

зерен кварца, полевого шпата, кальцита. По подшоше акчагыльского яруса встречены водоносные прослои, оказывающие влияние на консистенцию глин.

Пермская система в основном сложена породами уфимского яруса, состоящими из суглинков известковистых, известняков, доломитов и гипсов.

Гидрогеологические условия характеризуются наличием трех водоносных горизонтов и комплексов: водоносный горизонт делювиальных (спорадически развитых), четвертичных, пермских уфимских отложений и кунгурского яруса. Состав вод: гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-магние-вые, сульфатно-гидрокарбонатные кальциево-натриево-магние-вые с минерализацией 0,4—0,6 г/л. В разные годы отмечалось разное положение уровня подземных вод, наблюдения проводились

с 1991 года и показали максимально высокий уровень — 27 м, в 2012 году отмечалось значительное понижение на 11 м, в 2017 году уровень подземных вод в уфимском ярусе пермской системы вновь поднялся и зафиксирован на глубине 30,2 м.

Особенностью структурно-тектонических условий территории, оказывающей влияние на поверхностные процессы, является грабенообразная Сутолокская синклиналь, пространственно совпадающая с Аскаро-Черкасским прогибом, к восточному блоку которого примыкают тектонические «валы». Проявления неотектонических и экзотектонических нарушений пространственно и генетически связаны с заложением и развитием эрозионно-карстовых оврагов (рис. 3). Выявленные на космоснимках и при рекогносцировке древние карстовые провалы приурочены один

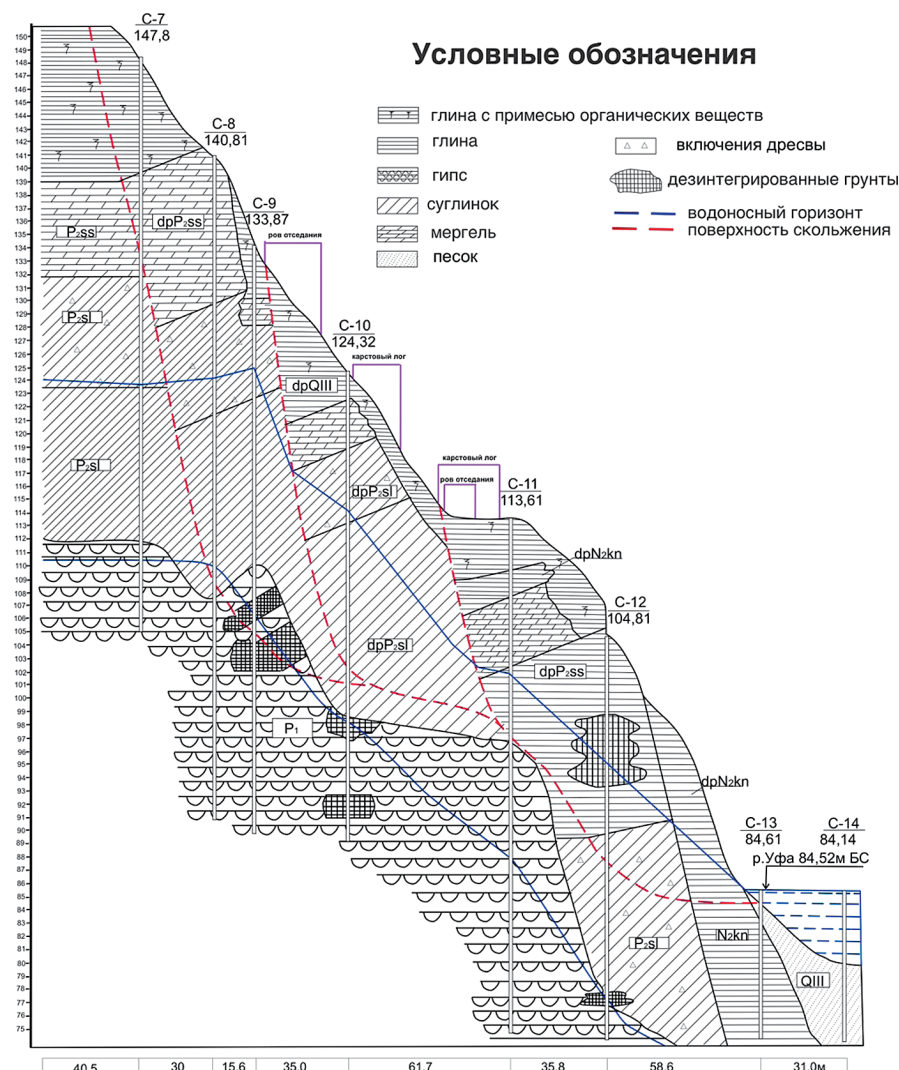


Рис. 2. Схематический разрез в районе распространения карста и оползней
Fig. 2. Schematic section in the area of karst and landslides

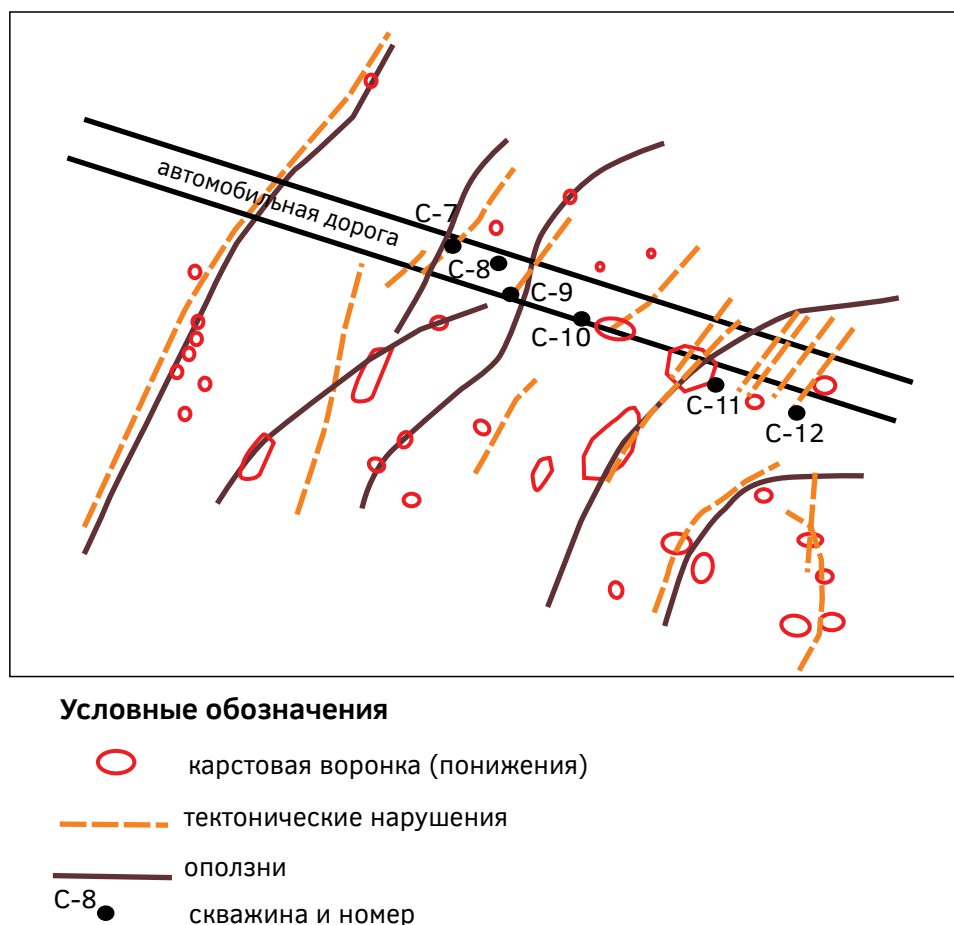


Рис. 3. Приуроченность карстовых воронок, оползней к тектоническим нарушениям на участке исследуемой площадки

Fig. 3. Karst funnels, landslides are associated with tectonic disturbances in the area of the study site

к водоразделам рр. Уфа и Сутолока и системе оперяющих трещин (разломов) Аскарово-Черкасского прогиба, контролирующего грабенообразную Сутолокскую синклиналь, другой приурочен к региональному разлому.

В зависимости от рельефа и мощности перекрывающих отложений (менее 40 м) на речных террасах рек Уфа и Сутолока могут быть распространены карстовые формы рельефа и проявлять активность провалообразования [5]. Данные рекогносцировочных исследований подтверждают наличие понижений в рельефе: диаметр от 4 до 94 м, глубина от 0,3 до 2,4 м, в основном округлой, дугообразно-эллипсовидной формы. При проведении буровых работ в районе провалов выявлено, что породы сильно дислоцированы, встречены карстовые брекчии, залегающие согласно в толще мергеля и суглинка.

Карст на рассматриваемой территории главным образом связан с кунгурскими гипсами и гипсо-

носными породами соликамского и шешминского горизонтов и, в значительно меньшей степени, с карбонатными соликамскими и шешминскими породами. Согласно схеме типизации карста Башкортостана, в пределах г. Уфа развиты три класса карста: сульфатный, карбонатный и карбонатно-сульфатный. По степени защищенности сверху некарстующимися породами преобладают два подкласса — перекрытый (камский) в пределах долин рек Белой и Уфы и закрытый (русский) на междуречье. Наряду с закрытым на междуречье имеются участки перекрытого, покрытого и голого карста. Структурно-тектоническое положение кровли карстующихся пород является одним из основных факторов, определяющих неравномерное развитие карста на междуречье. В процессе проведения работ выявлено, что современный рельеф в пределах междуречья во многом был предопределен рельефом кровли гипсов.

Установлено [1], что предел прочности на одноосное сжатие (σ_{str}) таких пород, как гипс, составляет 14—70 МПа. Мощность покровной толщи над выявленными в процессе буровых и геофизических работ подземными полостями в карстующихся породах региона, не превышает 100 м. Деформация массива над полостью не происходит до тех пор, пока сохраняется вертикальное давление в грунтах и несущая способность слоя. Среднее значение удельного веса преимущественно песчано-глинистых грунтов $\gamma = 28 \text{ кН/м}^3$ [5], возможное значение давления покровной толщи порядка 2,8 МПа. Структурная прочность перекрывающих пород в несколько раз больше вертикального давления, в связи с чем в нем невозможны пластические деформации, что позволяет в течение некоторого времени сохранять стабильное состояние вышележащим четвертичным и неогеновым отложениям. Разрушительные деформации не происходят до тех пор, пока растягивающие напряжения цилиндра (или перевернутого конуса) над сводом и сжимающие напряжения самого свода на глубине Z (см. рис. 4) находятся в равновесии. Только с ростом воронки начинается деформация грунта в сторону полости, ниже по склону возникают зоны повышенных вертикальных и касательных напряжений с последующим формированием трещин закола на поверхности.

Очаги и своды над подземными полостями — эта такая неравновесная открытая система в поле напряжений прилегающего к склону коренного массива под влиянием оползневой процесса, которая расположена между дневной поверхностью и горизонтом базиса оползания. Потеря устойчивости происходит по мере роста «окна полости» и постепенного снижения горизонтальных напряжений по радиальным силовым линиям, на поверхности они проявляются часто в виде трещин закола и родников, наблюдаемых в крыльях оползневых тел, в связи с тем что в центральной части блока грунты действуют как клин по отношению к коренному массиву.

Подобные случаи известны в практике довольно хорошо: так, формирование оползня в г. Баку вызвано выемкой грунта на глубину 10 м для строительства гостиницы, в г. Железнодорожном — котлованом глубиной 2 м.

Характерные проявления оползневых процессов на склонах вдоль берега реки Уфы: фронтальный характер тела, изогнутость береговой линии, ступенчатая форма рельефа, оползневые бугры ниже по склону, родники, в массиве — волнистый характер залегания кровли гипсов и мергелей, наличие дезинтегрированных грунтов.

Можно выделить оползни следующих типов на правобережном склоне:

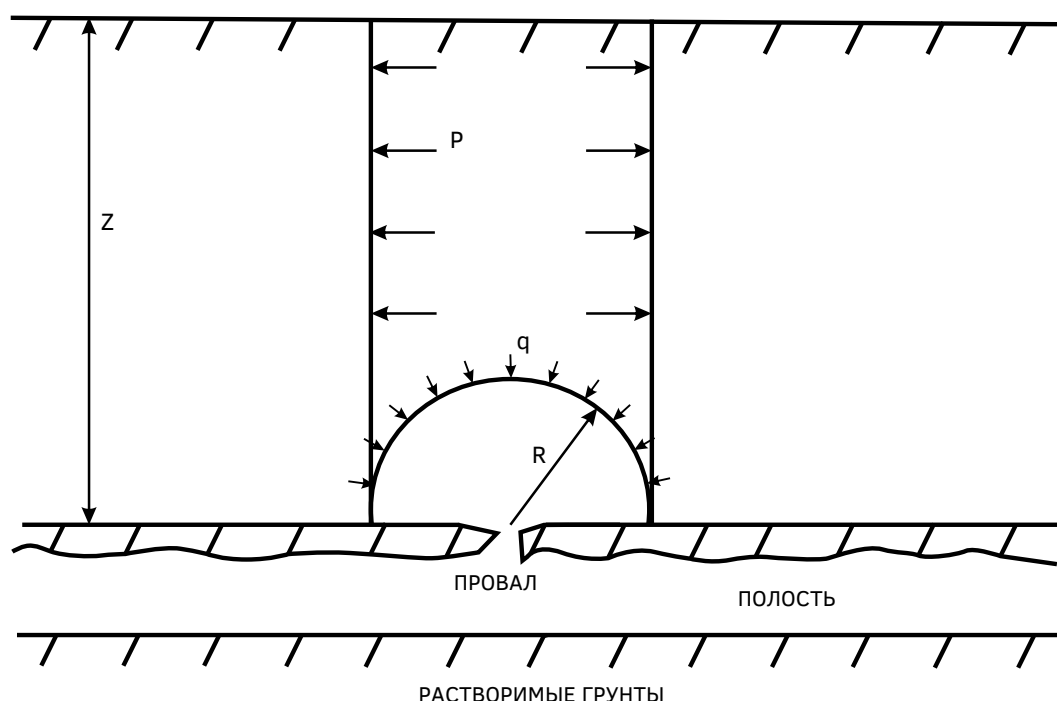


Рис. 4. Схема распределения напряжений над полостью
Fig. 4. Scheme of stress distribution over the cavity

1) глубокие оползни, захватывающие всю толщу четвертичных и неогеновых отложений, а также подстилающие их суглинки пермской системы;

2) оползни, ограничивающиеся породами, залегающими выше глин, относящихся к неогеновой системе;

3) поверхностные оползни, захватывающие только четвертичную систему.

Рассмотрим глубокие оползни, приуроченные, по нашему мнению, к провалообразованию карстующихся пород (см. рис. 2), которые связываются с развитием блокового оползня типа сжатия-выдавливания.

Оползневой блок имеет цилиндрический вид; по результатам бурения, выполненного в 2017 году, имеет наклон к реке или запрокинутую к плато поверхность. При потере устойчивости в понижениях происходит выпор в их сторону, при этом, с одной стороны, гипсы, скорее всего, контролируют поверхность скольжения (рис. 2), нагружая известковистые суглинки, с другой — в случае чрезмерной нагрузки захватывает их оползневыми деформациями. Анализ, выполненный благодаря расчетам устойчивости методом «Откос» вычислительного комплекса «SCAD Office», представлен на рисунке 5, он подтверждает данную гипотезу. В основе алгоритма расчета, реализованного в программе «Откос», лежит методика, предложенная В.Г. Федоровским и С.В. Курилло и основанная на методе переменной степени мобилизации сопротивления сдвигу.

Следует отметить, что основная причина образования оползней вдоль берегов реки

Уфы — возрастание касательных напряжений в пермских суглинках при уменьшении ширины оползневой террасы вследствие разуплотнения пород в зоне склона, сопровождающихся уменьшением их прочности, вызванного провалом, а также достаточно крутым углом наклона склона ($27\text{--}40^\circ$). Вертикальное давление грунта на глубине Z_i можно определить для блока следующим образом: $\sigma_{1i} = \gamma Z_i$.

Наличие водоносного горизонта в пермских отложениях оказывает влияние на состояние склона в связи с постоянной разгрузкой и выдвиганием оползневых накоплений в сторону реки (выносом деляпися в реку). Не исключено, что развитие оползней происходит одновременно по двум механизмам в разных участках склона: вязкопластичное течение вниз, хрупкое разрушение на участке отделения от плато, вызванное провалом.

Оползни данного типа смещаются по круговой, волнисто-наклонной или наклонной поверхности (рис. 2). В случае кругового вращения на оползневом склоне сторону впадины в пермских отложениях, обращенную к реке, можно рассматривать как нижнюю часть поверхности скольжения оползшего блока, сторону, обращенную к плато, — как запрокинутый блок. Поверхность скольжения ранее смещенных блоков (в оползневом очаге) регламентирует расположение нижней границы базиса в коренном массиве.

При условии развития карстовых процессов в массиве склона возникает несимметричное напряженное состояние массива [8].

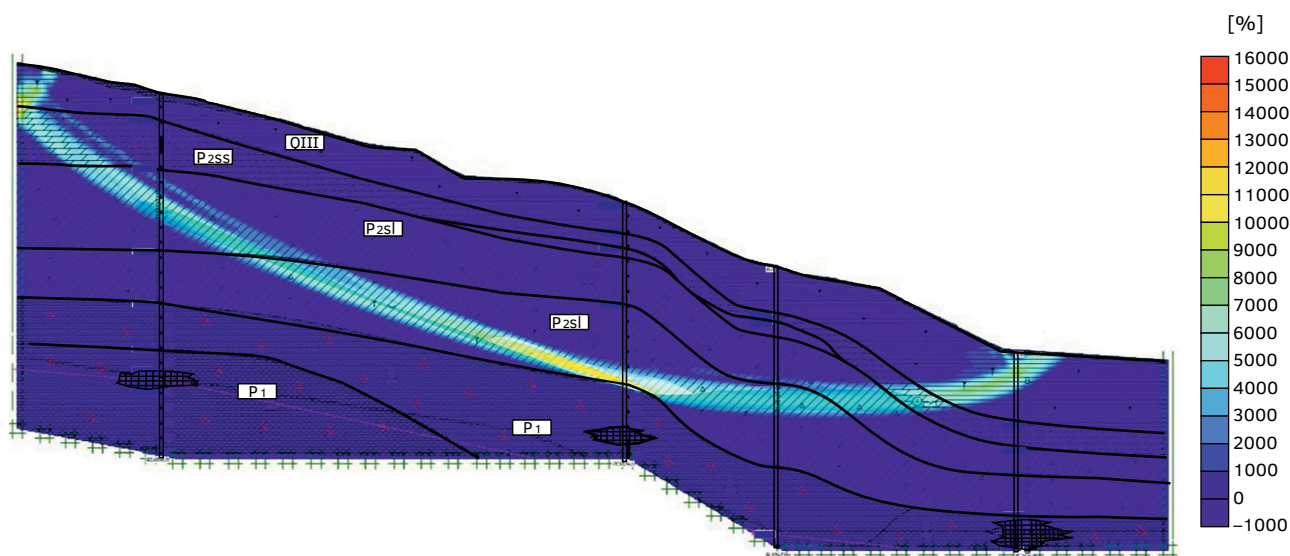


Рис. 5. Расчет устойчивости участка склона

Fig. 5. Slope section stability calculation

Наличие тектонических трещин, зон выветривания представляет собой результат растяжения или сжатия, порой они встречены в виде отрезков и разделяют массив на блоки.

В результате наблюдений на оползневых участках Москвы (на примере схода оползневого блока в 2006 году на участке Хорошево-1) и Одессы [4] установлено, что спустя четыре месяца после образования трещины закола происходит отделение блока от плато. Общим для рассмотренных в статье и приведенных в качестве примера оползней является наличие карстующихся пород на склоне, неровного «жесткого» основания, подстилающих глины, теряющие свое пластичное состояние.

Процессы смещения оползневых тел по поверхности правобережного склона, сопровождаемые развитием поверхностных форм карста и выщелачиванием гипсов в глубине массива, происходят в режиме длительной стадии подготовки к основному смещению. Для определения времени от стадии образования провала на поверхности до формирования тела оползня необходимо проведение длительного мониторинга за данными процессами.

Заключение

Последовательность оползнеобразования можно рассмотреть в следующем порядке:

- изменение гидродинамического напряжения внутри склона (береговая эрозия, сезонное

изменение уровня в реке и водоносном горизонте) оказывает воздействие на растворимость гипсов;

- в процессе провалообразования полость на глубине заполняется дезинтегрированными грунтами, как правило, подошва их залегает ниже уреза реки Уфы;

- формирование трещины закола на поверхности позволяет сделать вывод, что поле напряжений в массиве перестраивается: возникновение подобного силового воздействия сопровождается участком с разрывом, который сливается в единую поверхность скольжения, подготавливая к смещению весь массив;

- оторвавшийся массив перемещается по криволинейной поверхности скольжения, имеющей основной наклон в сторону реки нижней частью по направлению к реке, одновременно опускаясь и запрокидывая верхнюю часть к плато;

- суглинки пермских отложений, подстилающие глины неогена, выпираются под влиянием вышележащих слоев грунта в сторону реки, создавая прогиб мергелей и в дальнейшем формируя их разрыв;

- выдавливание происходит у подножия склона и подвергается одновременно сжатию массы, что приводит к формированию двух и более валов выдавливания, наблюдаемых на склоне;

- массив является нагрузкой на призму сопротивления выпиранию суглинков из-под мергелей, необходимо устанавливать положение его, при котором начинается новое выпирание суглинков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алванян А.К., Ибламинов Р.Г., Коноплев А.В. Физико-механические свойства гипсового камня и инженерно-геологические условия Богомоловского месторождения // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 83(09). С. 168—177.
2. Дёмин А.М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009. 79 с.
3. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Л.: ВНИМИ, 1971. 188 с.
4. Науменко П.Н. Закономерности развития и механизм катастрофических оползневых смещений на Одесском побережье / Вопросы изучения оползней и факторов, их вызывающих. Труды ВСЕГИНГЕО. 1968. Вып. 8. С. 42—59.
5. Постоев Г.П., Кучуков М.М., Казеев А.И. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 6. С. 22—31.
6. Смирнов А.И. Аномально крупные карстовые провалы Южного Урала и Предуралья // Геологический сборник. ИГ УНЦ РАН. 2013. № 10. С. 50—56.
7. Строительство автомобильного тоннеля в створе мостового перехода через р. Уфу, г. Уфа, РБ. Т. II. Кн. 2. Отчет об инженерно-геологических изысканиях (промежуточные материалы). III этап. Комплексные инженерно-геологические изыскания. Заказ № 045 к т/22261. Техархив ЗАО «ЗапУралТИСИЗ», 2013.
8. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. ГЕОС. М., 2003.
9. Martinotti M. Landslides, floods and sinkholes in a karst environment: the 1—6 September 2014. Gargano event, southern Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2017. No. 17. P. 467—480.

REFERENCE

1. Alvanyan A.K., Iblaminov R.G., Konoplev A.V. Physical and mechanical properties of gypsum stone and engineering-geological conditions of Bogomolovsky deposits // Scientific journal of KubSAU. 2012. No. 83(09). P. 168—177.
2. Demin A.M. Landslides in quarries: analysis and forecast. Moscow: GEOS, 2009. 79 p.
3. Instructions for monitoring the deformations of the sides, slopes of ledges and dumps in open pits and developing measures to ensure their stability. Leningrad: VNIMI, 1971. 188 p.
4. Naumenko P.N. Patterns of development and the mechanism of catastrophic landslide displacements on the Odessa coast / Issues of studying landslides and factors causing them. Proceedings of VSEGINGEO. 1968. Iss. 8. P. 42—59.
5. Postoev G.P., Kuchukov M.M., Kazeev A.I. Physical laws of pressure distribution in the geological environment // Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. 2020. No. 6. P. 22—31. DOI: 10.31857/S0869780920060107
6. Smirnov A.I. Abnormally large karst swells of the Southern Urals and Cis-Urals // Geological collection nickname. IG USC RAS. 2013. No. 10 P. 50—56.
7. Construction of a road tunnel in the alignment of the bridge over the river Ufa, city Ufa. Vol. II. Book 2. Report on engineering and geological surveys (intermediate materials). III stage. Complex engineering-geological surveys. Order No. 045 to t/22261. Technical archive ZapUralTISIZ, 2013.
8. Khomenko V.P. Regularities and forecast of suffusion processes. Moscow: GEOS, 2003.
9. Martinotti M. Landslides, floods and sinkholes in a karst environment: the 1—6 September 2014. Gargano event, southern Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2017. No. 17. P. 467—480.

ВКЛАД АВТОРА / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Орлова Н.А. — подготовила статью к публикации, начертила графику.

Nadezhda A. Orlova — prepared an article for publication, drew graphics.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Орлова Надежда Александровна — аспирант, младший научный сотрудник ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук»
13, Уланский пер., г. Москва 101000, Россия
e-mail: iderlit@mail.ru
тел.: +7 (926) 603-09-46
SPIN-код: 3498-1866
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4882-7990>

Nadezhda A. Orlova — post-graduate researcher, junior researcher Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS
13/2 Ulansky str., Moscow 101000, Russia
e-mail: iderlit@mail.ru
tel.: +7 (926) 603-09-46
SPIN-code: 3498-1866
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4882-7990>