



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
**СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

## ОПАСНЫЕ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Сборник материалов Международного семинара,  
посвященного 70-летию доктора геолого-минералогических наук,  
профессора  
**ВИКТОРА ПЕТРОВИЧА ХОМЕНКО**



*(г. Москва, 8 июня 2018 г.)*

© Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет, 2019

ISBN 978-5-7264-1933-6

Москва  
Издательство МИСИ – МГСУ  
2019

**О-60** **Опасные для строительства геологические процессы** [Электронный ресурс] : сборник материалов Международного семинара, посвященного 70-летию доктора геолого-минералогических наук Виктора Петровича Хоменко (г. Москва, 8 июня 2018 г.) / М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. — Электрон. дан. и прогр. (6,4 Мб). — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2019. — Режим доступа: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/> — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7264-1933-6

В сборнике опубликованы материалы, представленные на Международном семинаре, который прошел в НИУ МГСУ 8 июня 2018 г. и был посвящен 70-летию доктора геолого-минералогических наук, профессора Виктора Петровича Хоменко. На этом семинаре были рассмотрены и проанализированы актуальные проблемы, связанные с динамикой, механизмом, факторами и закономерностями развития опасных природных и техноприродных процессов, оценке опасности и риска, геоэкологическим проблемам урбанизированных территорий и промышленных объектов, развитию методологии и методам исследований геоэкологии и инженерной геологии.

Для научных сотрудников, специалистов, аспирантов и обучающихся в области геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии.

*Научное электронное издание*

*Материалы публикуются в авторской редакции.  
Авторы опубликованных материалов несут ответственность  
за достоверность приведенных в них сведений.*

Ответственные за выпуск:  
*А.А. Лавруевич, Т.Г. Макеева,  
В.П. Хоменко, С.Н. Чернышев, Ф.Ф. Брюхань, И. Ю. Яковлева*

Институт гидротехнического и энергетического строительства (ИГЭС НИУ МГСУ)

Сайт: [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru)

<http://iges.mgsu.ru/universityabout/Struktura/Instituti/IGES/>

Тел. +7 499 183 43 83

Е-mail: [iges@mgsu.ru](mailto:iges@mgsu.ru)

Кафедра инженерных изысканий и геоэкологии

Тел.: +7 (495) 287-49-14 (доб. 2380)

Е-mail: [LavrusevichAA@mgsu.ru](mailto:LavrusevichAA@mgsu.ru)

Для создания электронного издания использовано:  
Microsoft Word 2010, ПО Adobe Acrobat Pro.

Подписано к использованию 18.02.2019 г. Объем данных 6,4 Мб.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет».  
129337, Москва, Ярославское ш., 26.

Издательство МИСИ – МГСУ.

Тел.: (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95.

Е-mail: [ric@mgsu.ru](mailto:ric@mgsu.ru), [rio@mgsu.ru](mailto:rio@mgsu.ru).

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
<b>Хоменко В.П.</b> СУФФОЗИЯ: ТЕРМИНОЛОГИЯ И ФЕНОМЕНОЛОГИЯ	6
<b>Лаврусевич А.А.</b> ПСЕВДОКАРСТ	15
<b>Пендин В.В., Гусельцев А.С., Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Сироткина О.Н.</b> ОЦЕНКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПЛОЩАДКИ АЭС И ЕЕ ОКРЕСТНОСТЕЙ	22
<b>Казначеев П.А., Камшилин А.Н.</b> ОПЫТ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПРОЦЕССАМИ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ И ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ИХ МОНИТОРИНГА	30
<b>Миронюк С. Г., Ионов В. Ю.</b> ОПЫТ И ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОБВАЛЬНО-ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ МОРСКИХ ПОБЕРЕЖИЙ (НА ПРИМЕРЕ ХРЕБТА СЕМИСОМ, КРАСНОДАРСКИЙ КРАЙ)	33
<b>Кашперюк П.И., Никитина К.В.</b> К ВОПРОСУ О КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЯВЛЕНИЯХ В КАРСТУЮЩИХСЯ ТОЛЩАХ ГОРОДА МОСКВЫ	40
<b>Крашенинников В.С., Кашперюк П.И.</b> ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ НА ОДНОМ ИЗ КАРСТООПАСНЫХ УЧАСТКОВ МОСКВЫ	43
<b>Симонян В.В.</b> ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ И БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ	49
<b>Кропоткин М.П., Батурин В.И.</b> ОПОЛЗНЕВАЯ АКТИВНОСТЬ ВОСТОЧНОГО УЧАСТКА ВОРОБЬЕВЫХ ГОР В МОСКВЕ И ВОЗНИКАЮЩИЕ УГРОЗЫ	55
<b>Лаврусевич И.А., Хоменко В.П., Абенэ А.И.</b> ТИПИЗАЦИЯ ПОДЗЕМНОЙ ЭРОЗИИ ДЛЯ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ГЕОСИСТЕМЫ «ГРУНТ-СООРУЖЕНИЕ»	65
<b>Чернышев С.Н., Зоммер В.Л., Зоммер Т.В.</b> ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С ФИЛЬТРАЦИЕЙ В СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ ГИДРОУЗЛОВ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ	70
<b>Рахматуллина Е.В.</b> МОНИТОРИНГ ЗА ОСАДКАМИ ЗДАНИЯ В ЦЕНТРЕ МОСКВЫ ПОСЛЕ ЧАСТИЧНОГО УКРЕПЛЕНИЯ ОСНОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ	76
<b>Аникеев А.В., Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г.</b> ОЦЕНКА КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НОВЫХ ЛИНИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА В МОСКВЕ	86
<b>Лаврусевич А.А., Лу Шенпин, Лаврусевич И.А., Кузнецова О.Г., Лукьянова Ю.Н.</b> БУФЕРНЫЕ ЗОНЫ В СОСТАВЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА ЛЕССОВЫХ МАССИВОВ, КАК НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ЕГО УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ	94
<b>Ходжибаев С.Д.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ТРЕЩИНОВАТОСТИ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
Приложение 1	105

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящий сборник включает доклады, заслушанные 8 июня 2018 года на Международном научно-практическом семинаре «Опасные для строительства геологические процессы» в связи с 70-летним юбилеем доктора геолого-минералогических наук, профессора Виктора Петровича Хоменко.

Семинар был посвящен обсуждению актуальных проблем: динамике, механизму, факторам и закономерностям развития опасных природных и техноприродных процессов, оценке опасности и риска, геоэкологическим проблемам урбанизированных территорий и промышленных объектов, развитию методологии и методам исследований геоэкологии и инженерной геологии, мониторингу состояния геологической среды.

Программа международного семинара включала рассмотрение вопросов, посвященных решению научно-практических задач в пределах научной специальности «Геоэкология». Геоэкология – междисциплинарная наука, изучающая состав, строение, свойства, процессы, физические и геохимические поля геосфер Земли как среду обитания человека и других организмов. Основная цель изучения изменений биосферы под воздействием природных и техногенных факторов.

На международном научно-практическом семинаре были заслушаны доклады по следующим приоритетным направлениям:

- изучение природных и природно-техногенных опасных явлений;
- комплексное изучение территорий и рациональное природопользование при строительстве уникальных объектов и особо ответственных сооружений;
- мониторинг состояния геологической среды.

Современные геологические процессы представляют собой важную, а в некоторых случаях важнейшую компоненту инженерно-геологических условий, которая одновременно является и наиболее подвижной, изменчивой наряду с гидрогеологическими условиями. Одновременно с природными факторами при освоении территорий ярко проявляется роль техногенных факторов активизации процессов. Оценка опасности геологических процессов, как и разработка мероприятий по снижению риска, требуют глубокого понимания природы процессов, механизма их развития и факторов активизации.

Всего в оргкомитет на Международный научно-практический семинар «Опасные для строительства геологические процессы» поступило 15 докладов из ведущих организаций в основном Российской Федерации: г. Москвы, стран СНГ, представленной Таджикистаном – г. Душанбе, а также из Китая: г. Шанхай.

Принятые к публикации доклады были заслушаны на трех секциях, соответствующих тематике семинара и паспорту специальности. Доклады были заслушаны на Международном научно-практическом семинаре.

Ниже излагается содержание докладов, поступивших на совещание. Все доклады опубликованы в авторской редакции.

*Председатель оргкомитета*

*Международного семинара*

*«Опасные для строительства геологические процессы»*

*Заведующий кафедрой*

*«Инженерных изысканий и геоэкологии»,*

*Доктор геолого-минералогических наук*

*Лаврусевич Андрей Александрович*

## СУФФОЗИЯ: ТЕРМИНОЛОГИЯ И ФЕНОМЕНОЛОГИЯ

Хоменко В.П.

(НИУ МГСУ г. Москва)

**Аннотация:** Рассмотрена противоречивая ситуация, связанная с современным пониманием термина «суффозия» в русском языке. С позиций наиболее широкой трактовки этого понятия проанализирована роль суффозии как опасного для строительства геологического процесса, рассмотрены ее основные генетические разновидности. Предпринята попытка сопоставления русской и английской терминологии, используемой при описании феноменов, подпадающих под широкую трактовку понятия «суффозия».

**Ключевые слова:** суффозия, горные породы, подземные воды, опасность, строительство.

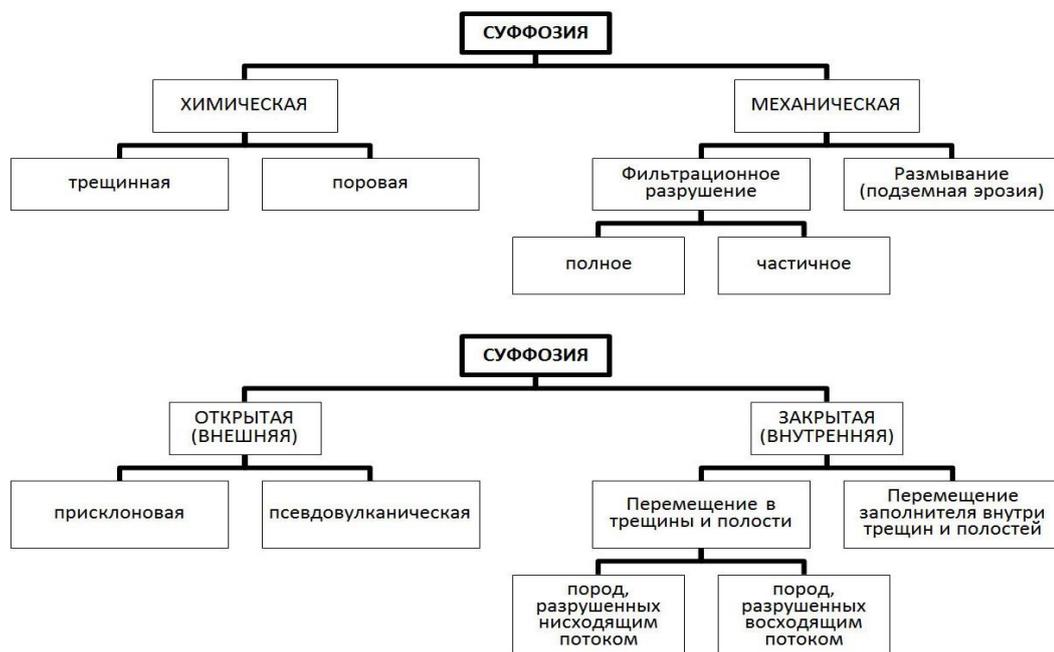
В настоящее время в России существуют три основных трактовки понятия «суффозия». Сторонники первой трактовки именуют суффозией только свободное перемещение частиц в поровом пространстве дисперсных несвязных пород под действием фильтрации воды [3], и именно такое понимание этого термина в наши дни укоренилось в англо-, франко- и германоязычной научно-технической литературе. Согласно второй трактовке, суффозия представляет собой механическое разрушение и вынос дисперсных пород потоком подземных вод [6]. Третья (наиболее широкая, но отнюдь не наиболее распространенная) трактовка подразумевает под словом «суффозия» разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и сцементированных обломочных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов [13]. Именно это определение понятия «суффозия» было включено в строительные нормы [10].

Широкая трактовка термина «суффозия» возвращает нас к его истокам. Русский по происхождению термин «суффозия» был, тем не менее, образован от латинского слова «suffossio», что по-русски означает «подкапывание». Этот термин понимался достаточно широко самим его автором – А.П. Павловым, который, впрочем, введя его в обиход в 1898 году в своей широко известной научной статье [8], не дал его определения, что не помешало автору представить развернутое теоретическое описание самого процесса. В том же 1898 году произошло еще одно знаковое событие, связанное с изучением суффозии, но уже не в Российской, а в Британской империи. Благодаря теоретическим разработкам Дж. Клибборна (J. Clibborn) и экспериментальным исследованиям Дж. Бересфорда (J.S. Beresford), удалось предсказать вызванное суффозией (piping) разрушение плотины Нарора (Narora) на реке Ганг в Индии за несколько дней до этого события [21]. По-видимому, это был первый случай такого рода в практике гидротехнического строительства. Никто не пострадал, а через два года плотина была восстановлена с применением противосуффозионной защиты.

С гидротехническим строительством связана и самая тяжелая катастрофа, вызванная суффозией [14]. Мелиоративная плотина Титон (Teton) высотой около 90 м, расположенная в штате Айдахо (США), была разрушена 5 июня 1976 года во время первого заполнения водохранилища. Погибли 11 человек, а ущерб превысил 400 миллионов долларов. Суффозия проявила себя здесь в виде размывания (internal erosion) лессовых пород ядра плотины на контакте с трещиноватыми риолитами, залегающими в ее основании. Приблизительно за 5 часов до разрушения плотины в ее нижнем бьефе наблюдалось просачивание мутной воды.

Из широкого понимания термина «суффозия» вытекает необходимость ее классифицирования, причем как минимум по двум признакам (рис. 1). Каждый из видов суф-

фозии, выделенных по характеру разрушения горных пород, протекает в специфичной для него среде – горных породах определенного типа (табл. 1). Их можно назвать суффозионно неустойчивыми



**Рис. 1.** Классификации суффозии, предложенные В.П. Хоменко [13]: по характеру разрушения горных пород (вверху) и по условиям выноса и перемещения разрушенных пород (внизу)

**Таблица 1**

**Суффозионно неустойчивые горные породы**

Горные породы, подверженные суффозионному разрушению			Вид суффозии
Скальные: обломочные, цементированные растворимым цементом, трещиноватые			Химическая трещинная суффозия
Дисперсные	связные и несвязные	засоленные водонепроницаемые	Химическая поровая суффозия
		любые	Подземная эрозия
	несвязные	любые	Полное фильтрационное разрушение
		с бутовой текстурой	Частичное фильтрационное разрушение

Содержание табл. 2 свидетельствует о том, что возможность реализации каждого из видов суффозии, выделенных по условиям выноса и перемещения разрушенных горных пород, обусловлена определенными особенностями геологической среды.

Суффозия во всех ее разновидностях вызывает изменение структуры горных пород или их массивов, и способна проявиться на земной поверхности или под фундаментами зданий и сооружений. Суффозионные проявления бывают поверхностными и подземными. К первым относятся псевдовулканы, ниши и пещеры, оползни, поноры, провалы, оседания, а ко вторым – полости, псевдоплыунные зоны, зоны разуплотнения в дисперсных породах и зоны дезинтеграции в скальных породах. Любопытно отметить, что первые опубликованные упоминания о проявлениях суффозии (seepage erosion) на крутых склонах в графстве Кент (Великобритания) относятся к концу XVIII века [18].

Таблица 2

## Условия, необходимые для выноса и перемещения пород, разрушенных суффозией

Геолого-геоморфологическая обстановка, обеспечивающая суффозионный вынос			Вид суффозии
Характер рельефа земной поверхности	Структура массива горных пород	Гидрогеологические условия	
Наличие склона	Любая	Разгрузка подземных вод в виде нисходящего источника	Присклоновая
Любой		Разгрузка подземных вод в виде восходящего источника	Псевдовулканическая
	Наличие незакольматированных трещин и полостей	Наличие вертикального восходящего потока подземных вод	Перемещение в трещины и полости пород, разрушенных восходящим потоком
		Наличие вертикального нисходящего потока подземных вод	Перемещение в трещины и полости пород, разрушенных нисходящим потоком
	Наличие закольматированных трещин и полостей	Наличие нисходящего или горизонтального потока подземных вод	Перемещение заполнителя трещин и полостей

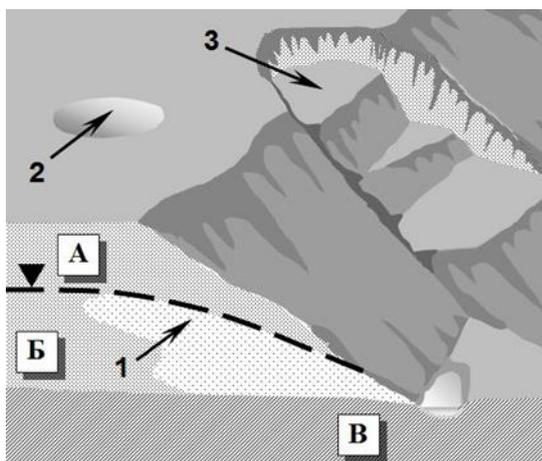
**Химическая суффозия и частичное фильтрационное разрушение.** Оба процесса представляют собой массоперенос в подземных водах, приводящий к разуплотнению и разупрочнению пород (рис. 2). В некоторых случаях суффозионное разупрочнение пород, слагающих склон, приводит к образованию оползней. Последующее уплотнение суффозионно разуплотненных пород может происходить самопроизвольно под действием их собственного веса и сопровождается образованием на земной поверхности оседаний (западин). Оно резко ускоряется при внешних статических нагрузках, что нередко приводит к деформациям передающего их здания или сооружения. Уплотнение однородных по гранулометрическому составу несвязных дисперсных пород, испытавших частичное фильтрационное разрушение, инициируется только динамическими воздействиями.

Английскими эквивалентами понятия «частичное фильтрационное разрушение» являются слова «suffusion» или «suffosion» [16]. Точный эквивалент понятия «химическая суффозия» в англоязычной литературе отыскать очень трудно, хотя в переведенных на английский язык и опубликованных за рубежом работах отечественных специалистов в этой роли выступает термин «leaching» [20].

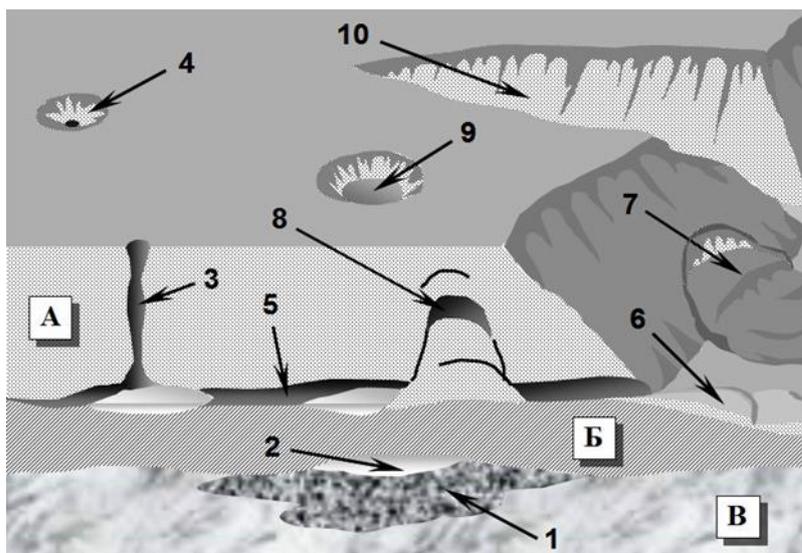
**Подземная эрозия.** Процесс приводит к формированию подземных каналов (рисунки 3), которые могут принимать размеры пещер [2]. Иногда подземную эрозию, протекающую в сцементированных обломочных, глинистых и лессовых породах называют, соответственно, кластокарстом, глинистым карстом и лессовым псевдокарстом.

В ходе присклоновой подземной эрозии субгоризонтальный суффозионный канал растет в длину и вширь, что приводит к обрушению его кровли, вплоть до провалообразования. Иногда там, где подземный канал раскрывается на склоне, образуется оползень. Обрушившиеся или оползшие массы горных пород, если они обладают низкой проницаемостью, способны полностью перекрыть канал. Если фактор, инициировавший присклоновую подземную эрозию, продолжает действовать, то рано или поздно произойдет одно из двух: либо процесс продолжится за счет размывания щелей при

неплотной «закупорке» канала, либо на подземную эрозию наложится поверхностная. Во втором случае начинается формирование оврага, ось которого совпадает с осью суффозионного канала.



**Рис. 2.** Геологические явления, обусловленные химической суффозией и частичным фильтрационным разрушением: 1 – зона разуплотнения; 2 – оседание (западина); 3 – оползень просадочного типа по В.В. Лисовину [5]. Горные породы: А – проницаемые дисперсные засоленные или несвязные с бутовой текстурой, находящиеся в зоне аэрации; Б – то же, в зоне насыщения; В – слабопроницаемые



**Рис. 3.** Геологические явления, обусловленные подземной эрозией:

1 – зона дезинтеграции; 2 – кластокарстовая полость, заполненная водой; 3 – вертикальный суффозионный канал (понор); 4 – расширенный понор (воронка просасывания); 5 – горизонтальный суффозионный канал (пещера); 6 – аккумулятивные накопления в виде «языка»; 7 – оползень над входом в суффозионную пещеру по К. Терцаги [11]; 8 – полость обрушения; 9 – провал; 10 – овраг. Горные породы: А – размываемые дисперсные; Б – слаборазмываемые слабопроницаемые; В – проницаемые скальные обломочные, цементированные растворимым цементом

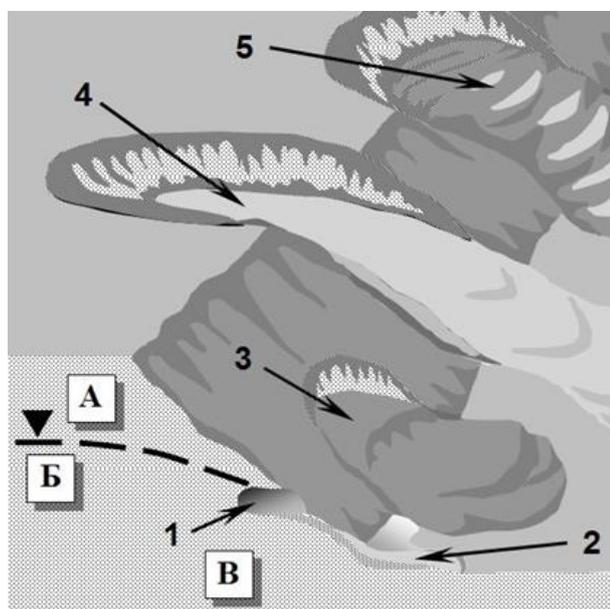
В отличие от присклоновой, закрытая (внутренняя) подземная эрозия связана с появлением и ростом в суффозионно неустойчивых (размываемых) породах не субгоризонтальных, а субвертикальных каналов (водопоглощающих поноров), которые в своей верхней части могут принимать вид так называемых воронок просасывания. Вход в субвертикальный канал расположен на поверхности земли или на дне водоема, а выход – в кровле какой-нибудь полости. Вблизи склона эта полость-приемник может

представлять собой субгоризонтальный суффозионный канал, и тогда обе разновидности подземной эрозии развиваются совместно.

При низкой проницаемости размываемых пород условием, необходимым для развития подземной эрозии, становится наличие в них первоначального сквозного подземного канала любого происхождения. Он должен соединять источник поступления воды с областью суффозионного выноса, а вода в нем должна свободно течь в турбулентном режиме.

В английском языке рассматриваемый процесс именуется разными терминами, основными из которых являются «internal erosion», «subsurface erosion», «piping» и «tunnel erosion» [17]. Следует, однако отметить, что понятие «piping» имеет более общий характер и скорее является эквивалентом русского понятия «механическая суффозия».

**Присклоновое фильтрационное разрушение.** Как открытое, так и закрытое фильтрационное разрушение горных пород может протекать в двух формах: плавной и резкой. На склонах различие между ними проявляется особенно четко (рис. 4).



**Рис. 4.** Геологические явления, обусловленные присклоновым фильтрационным разрушением: 1 – суффозионная ниша; 2 – аккумулятивные накопления в виде «языка»; 3 – оползень над суффозионной нишей (уступом); 4 – оползень суффозионного механизма по И.О. Тихвинскому [12]; 5 – оползень выплывания по В.В. Кюнтцелю [1]. Горные породы: А – дисперсные с высокой поровой проницаемостью, находящиеся в зоне аэрации; Б – то же, в зоне насыщения; В – слабопроницаемые.

Морфологическим признаком плавного протекания процесса является устойчивая, нередко армированная корневой системой растений, ниша, сформировавшаяся в водопроницаемых породах, которая все глубже проникает внутрь склона, постепенно превращаясь в «глухой» подземный канал. При обрушении его кровли последствия такого локализованного фильтрационного разрушения внешне неотличимы от последствий подземной эрозии. Ниша, врезающаяся в склон подобно штольне, может вызвать образование провалов вдоль ее оси, а если она растет как поперек, так и вдоль склона, образуя уступ, то следует ожидать обваливания или оползания нависающего над ней «карниза».

Результатом резкого протекания присклонового фильтрационного разрушения является особый тип оползней, которые подробно изучавший их И.О. Тихвинский [12] называет оползнями суффозионного механизма. Это – циклическое обваливание пород

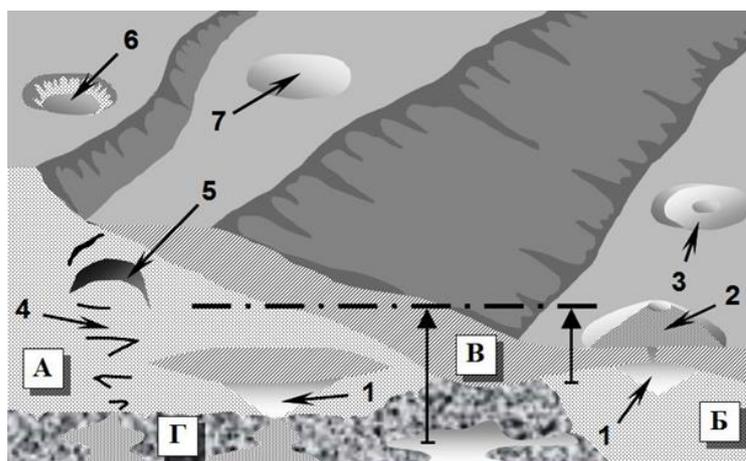
над вновь возникающими суффозионными нишами, которое распространяется вверх по склону, а деформируемая обводненная масса, состоящая из пород, претерпевших разрушение, стекает к его подножью. Другая разновидность резкого присклонового фильтрационного разрушения представляет собой практически мгновенное превращение определенного объема водопроницаемых пород в псевдоплывун, сопровождающееся его смещением вниз по склону и оплыванием сместившейся массы (оползень выплывания).

В тех случаях, когда присклоновое фильтрационное разрушение протекает в резкой форме, в роли фактора, инициирующего этот процесс, часто выступает «внезапный» выход водонасыщенных пород на поверхность склона. Это часто происходит в результате разрушения перекрывающего склон слабопроницаемого экрана. Если склон перекрыт глинистыми делювиальными или оползневными накоплениями, они могут быть «срезаны» оползнями сдвига, которые на береговых склонах, как правило, являются следствием абразии или эрозии. Перекрывающий склон практически непроницаемый экран образуется также вследствие сезонного промораживания водонасыщенных пород. Прорыв такого временного и непрочного водоупора часто происходит под давлением воды (нередко горячей), поступившей из поврежденных коммуникаций.

Наложение поверхностной эрозии на присклоновое фильтрационное разрушение приводит к образованию своеобразных оврагов, которые называют эндолинными [7]. В то же время, овражная эрозия подготавливает и даже инициирует рассматриваемый процесс.

В англоязычной научно-технической литературе присклоновое фильтрационное разрушение обычно именуется термином «seepage erosion» [18], особенно если процесс развивается на естественных склонах. Если же речь идет об откосах земляных плотин и дамб, англоязычные специалисты намного чаще используют термин «backward erosion piping» [15] или просто «backward erosion».

**Фильтрационное разрушение восходящим потоком.** Разрушение горных пород восходящим фильтрационным потоком встречается в трех разновидностях: присклоновой, псевдовулканической и закрытой. Последние две показаны на общей блок-схеме (рис. 5).



**Рис. 5.** Геологические явления, обусловленные фильтрационным разрушением пород восходящим потоком: 1 – суффозионная полость, заполненная водой; 2 – псевдовулкан; 3 – псевдокальдера (провал); 4 – зона фильтрационного разрушения пород восходящим потоком, принимающего вид единого суффозионно-обвального процесса; 5 – полость обрушения; 6 – провал; 7 – оседание, образовавшееся в результате прогиба. Горные породы: А – дисперсные с высокой поровой проницаемостью, находящиеся в зоне аэрации; Б – то же, в зоне насыщения; В – глинистые слабопроницаемые; Г – содержащие трещины и полости любого происхождения

Основываясь на взглядах А.М. Демина [9], можно предположить, что последствия присклонового фильтрационного разрушения принципиально не зависят от того, было оно вызвано горизонтальным или восходящим потоком. В обоих случаях образуются оползни выплывания, а суффозионно-оползневое разрушение берега водоема может быть вызвано как спадом, так и подъемом уровня воды [4].

Псевдовулканическая суффозия начнется, если восходящий поток подземных вод имеет возможность концентрированной разгрузки в виде «грифона» на поверхности земли, чему благоприятствует наличие на ней водонепроницаемого экрана естественного или искусственного происхождения. Когда такого экрана нет или он имеет сквозные нарушения сплошности, процесс инициируется подъемом уровня грунтовых вод выше отметок земной поверхности. При наличии сплошного водонепроницаемого экрана псевдовулканическая суффозия может быть вызвана его разрушением, если пьезометрический напор воды в породах, перекрытых экраном, превышает его мощность.

С максимальной полнотой псевдовулканическая суффозия проявляется при разгрузке первого от поверхности напорного водоносного горизонта через сквозное нарушение сплошности перекрывающего его глинистого водоупора. В этом случае на кровле водоупора (а, следовательно, и на поверхности земли) формируется специфическое аккумулятивное образование – псевдовулкан. Под подошвой водоупора растет заполненная водой полость, а водоупор над ней испытывает прогиб. В момент обрушения водоупора образуется псевдокальдера, которая затем деформируется, а само обрушение может быть инициировано ростом полости или спадом напора воды в подстилающих водоупор породах.

Закрытая (внутренняя) разновидность фильтрационного разрушения пород восходящим потоком имеет схожие причины. Если существует водоупор, отделяющий проницаемые породы от полости-приемника, и напор воды в ней превышает его мощность, то фильтрационное разрушение этих пород может быть инициировано появлением в водоупоре сквозного нарушения его сплошности. Если же водоупор отсутствует или уже имеет такое нарушение, то процесс начнется в результате появления в водонепроницаемых породах восходящего потока. В неводонасыщенных породах он возникнет при поступлении в них воды снизу, из полости-приемника в ходе подъема уровня подземных вод, а в водонасыщенных – при оттоке из них воды, например, вследствие искусственного водоотбора. При этом в испытывающих разрушение породах происходит циклическое формирование сменяющих друг друга заполненных и не заполненных водой полостей. Вторые возникают над первыми в результате обрушения их кровли, а первые образуются на месте вторых после их заполнения вытесненной водой. Процесс распространяется снизу-вверх, и воспрепятствовать ему могут только достаточно мощные слои связных пород, слагающих промежуточные водоупоры. Максимальная высота, на которую распространяется фильтрационное разрушение, ограничена отметкой уровня или пьезометрического напора горизонта, из которого вода поступает вверх. Если процесс способен достичь земной поверхности, на ней образуется провал или оседание.

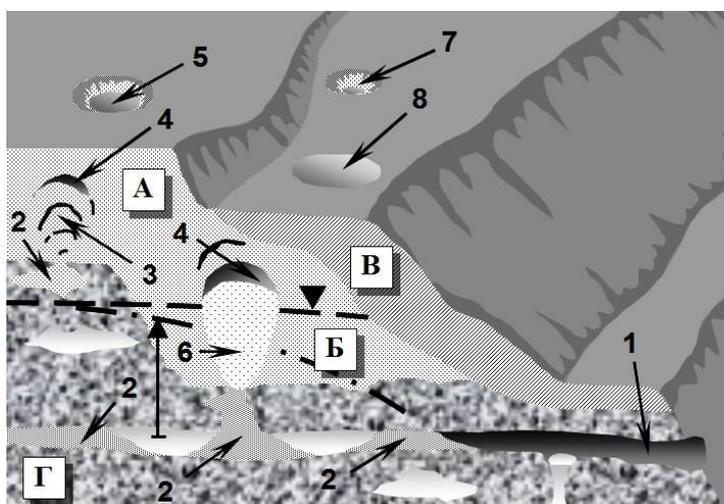
В англоязычных странах специалисты используют много разных терминов для обозначения отдельных разновидностей фильтрационного разрушения пород восходящим потоком. При этом роль обобщающего понятия, судя по всему, играет словосочетание «*ripping by heave*» [19].

**Закрытое фильтрационное разрушение нисходящим потоком.** В ходе закрытого фильтрационного разрушения нисходящим потоком происходит истечение разрушенных пород (псевдоплавунна) в полость-приемник и обрушение пород над псевдоплавунной зоной, которое может принять вид провалообразования. Процесс протекает по-разному в зависимости от того, подвергаются ему водонасыщенные или неводонасыщенные породы, что можно видеть на рисунке 6.

В неводонасыщенных породах, перекрывающих открытую незакольматированную и обезвоженную трещину или полость, направленный в нее нисходящий фильтрацион-

ный поток возникает при любых поступлениях воды извне в зону аэрации. Его разрушительная работа проявляется в циклическом обрушении вновь возникающих не заполненных водой суффозионных полостей, которое может достигнуть земной поверхности в виде провала. Такой провал, учитывая гидрогеологические условия его образования, целесообразно именовать суффозионным провалом вадозного типа.

Для закрытого фильтрационного разрушения нисходящим потоком водонасыщенных пород достаточно выхода не заполненной водой полости-приемника на контакт с ними, а если приемник заполнен водой, процесс инициируется ее оттоком и (или) поступлением воды в вышележащие породы. Направленный вниз фильтрационный поток разрушает водонасыщенные породы внутри четко ограниченной зоны, в результате чего они истекают в приемник. После того, как верхняя точка зоны фильтрационного разрушения достигнет подошвы слабопроницаемого слоя или свободной поверхности грунтовых вод, она растет только вширь, вызывая прогиб или дискретное обрушение вышележащих пород, вплоть до образования оседания или провала. Эти феномены можно назвать суффозионными оседаниями и провалами фреатического типа.



**Рис. 6.** Геологические явления, обусловленные закрытым фильтрационным разрушением пород нисходящим потоком: 1 – полость несуффозионного происхождения (пещера), лишенная заполнителя в результате суффозии; 2 – заполнитель полостей; 3 – зона совместного проявления суффозии и обрушения в виде суффозионно-обвального процесса; 4 – полость обрушения; 5 – провал вадозного типа; 6 – псевдоплавунная зона; 7 – провал фреатического типа; 8 – оседание, образовавшееся в результате прогиба. Горные породы: А – дисперсные с высокой поровой проницаемостью, находящиеся в зоне аэрации; Б – то же в зоне насыщения; Б – глинистые слабопроницаемые; Г – содержащие трещины и полости любого происхождения

Закрытое фильтрационное разрушение пород нисходящим потоком тесно связано с миграцией заполнителя трещин и полостей. Разрушаемый и перемещаемый заполнитель часто сам представляет собой продукт суффозионного выноса вышележащих пород в полость-приемник, а его разрушение иногда является фактором, инициирующим такой вынос. В массиве скальных пород жесткая внутренняя поверхность трещины или полости пространственно ограничивает развитие этого вида закрытой суффозии. В случае выхода такой трещины или полости на склон, фильтрационное разрушение и вынос заполняющих ее пород способны сформировать нишу, и суффозионный процесс будет протекать по схеме присклоновой подземной эрозии, но без образования провалов или оползней.

В английском языке не существует особых терминов для обозначения этих процессов, возможно потому, что они чаще всего бывают связаны с карстом, а в этой обла-

сти существует своя терминология. В целом же, феномены такого рода укладываются в обобщающее понятие «*ripping*».

### Литература

1. Григоренко А.Г., Кюнтцель В.В., Новак В.Е., Тамутис З.П. Инженерная геодинамика. – Киев: Лыбидь, 1992. - 296 с.
2. Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н. Спелеология (Терминология, связи с другими науками, классификация полостей). – Кунгур: Горный институт УрО АН СССР, 1989. - 34 с.
3. Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. – М.: Госстройиздат, 1957, - 295 с.
4. Кусковский В.С., Тржцинский Ю.Б. Инженерно-геологические и гидрогеологические проблемы водохранилищ Сибири // Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геокриологии районов интенсивной нагрузки и охрана геологической среды: Тезисы докладов 1-го Всесоюзного съезда инженеров-геологов, гидрогеологов и геокриологов. Киев, 10-14 октября 1988. Ч.3: Закономерности изменения инженерно-геологических, гидрогеологических и геокриологических условий при интенсивном техногенном воздействии. Киев, 1989. с. 135-136.
5. Лисовин В.В. К вопросу о происхождении оползней просадочного типа // Проблемы инженерной геологии Северного Кавказа: Материалы научно-технической конференции 14-16 мая 1968 г. Ставрополь, 1968, с. 105-106.
6. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Л.: Недра, 1977, - 479 с.
7. Матвеев Н.П. Роль суффозии в образовании эндоинных оврагов // Землеведение, 1969, т. 8, с. 117-129.
8. Павлов А.П. О рельефе равнин и его изменениях под влиянием работы подземных и поверхностных вод // Землеведение, 1898, т. 5, кн. 3-4, с. 91-147.
9. Проблемы классифицирования склоновых гравитационных процессов / Отв. ред. М.В. Чуринов, Е.А. Толстых. – М.: Наука, 1985, - 205 с.
10. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 / Минрегион России. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 2012, - 60 с.
11. Терцаги К. Механизм оползней / Пер. с англ. // Проблемы инженерной геологии. Выпуск 1. М.: Издательство иностранной литературы, 1958, с. 174-219.
12. Тихвинский И.О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. – М.: Наука, 1988. - 144 с.
13. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. – М.: ГЕОС, 2003, -216 с.
14. Engemoen, W. O., Redlinger, C. G. Internal erosion incidents at Bureau of Reclamation dams // Managing our Water Retention Systems: Proceedings of 29th USSD Annual Meeting and Conference, Nashville, TN, April 20-24, 2009. Denver, CO: U.S. Society on Dams, 2009, p. 731-745.
15. Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees / Editor: Stephane Bonelli. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013, 388 p.
16. Fannin R. J., Slangen P. On the distinct phenomena of suffusion and suffosion // Géotechnique Letters, 2014, Vol. 4, Issue 4, p. 289-294.
17. Glossary of geology / Margaret Gary, Robert McAfee, Jr, and Carol L. Wolf, editors; with a foreword by Ian Campbell. – Washington, D.C.: American Geological Institute, 1972, - 52 p.

18. Hutchinson J.N. Damage to slopes produced by seepage erosion in sands // Landslides and mudflows: Reports of Alma Ata International Seminar, October 1981. Moscow: Centre of International Projects, GKNT, 1982, p. 250-265.
19. Kälın M. Hydraulic piping – theoretical and experimental findings // Canaian geotechnical journal, 1977, vol. 14. No 1, p. 107-124.
20. Petrukhin V. P. Construction of structures on saline soils. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1993, - 255 p.
21. Skempton A.W. Landmarks in early soil mechanics // The measurement, selection, and use of design parameters in geotechnical engineering: Proceedings of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, UK, September 1979. Vol. 5, London: British Geotechnical Society, 1979, p. 1-26.

## ПСЕВДОКАРСТ

Лаврусевич А.А.

(НИУ МГСУ, Москва)

**Аннотация.** В статье приводятся данные о сложном геологическом процессе – псевдокарсте. Краткая история становления и утверждения термина в науке. Его активное развитие в связи с техногенезом в последние десятилетия ставят этот опасный геологический феномен в один ряд с такими грозными процессами как оползни, сели, обвалы, карст и др. Приведены примеры вновь выделенных видов псевдокарста. Показано, что недоучет механизма и скорости развития псевдокарстовых процессов, отсутствие понимания природы его развития, приводит к возникновению сложных, иногда многоступенчатых чрезвычайных ситуаций.

**Ключевые слова:** псевдокарст, виды, механизм, мониторинг, рекреационное освоение.

«Псевдокарст - западинно-впадинный рельеф, образованный понижениями, внешне напоминающими карст...» [1]. Более ста лет идет дискуссия о содержании понятия «псевдокарст». Изучению карстоподобных форм рельефа, образованных в результате иных процессов, посвящены многочисленные публикации отечественных и зарубежных авторов. Они отмечают, что основное отличие псевдокарста от карста – отсутствие карстующихся пород, хотя формы рельефа как подземные, так и поверхностные, одинаковы. Впервые термин «псевдокарст» появился в научной литературе в 1906 году, его ввел немецкий геолог Вальтер фон Кнебель. Известно, что Вальтер фон Кнебель, немецкий геолог, использовал это специальное обозначение еще в 1906г в его работе "Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene" [2]. Очевидно, он впервые использовал этот термин в конкретном применении к псевдокарсту. Наблюдая, как в Исландии водные потоки исчезают в трещиноватых базальтах, он записал: «во многих областях распространения лавы, характерны потоки внутри лавового массива, что является особенностью его структурно-текстурного строения и это необходимо рассматривать как «псевдокарст» ("pseudoverkarstung") [2, с.171]. В Риме описываются псевдокарстовые пещеры в лавовых трубках на горе Этна [3]. Много работ, в которых косвенно описаны псевдокарстовые формы рельефа известны в большинстве стран Европы, по крайней мере, со времен средневековья. Наличие больших псевдокарстовых пещер, связанных с ледниками, также были известны с давних времен.

С 1927 года, советские ученые впервые изучают карстоподобные формы в районах вечной мерзлоты. В 1931 и 1935, Ф.П.Саваренский написал о карстовых явлениях в глинистых отложениях и лессах, называя их "глинистый карст" и "лессовым карстом"[4]. В 1939 г. опубликована работа Ф.П.Саваренского [4] в которой употребляются понятия «большой» и «малый» карст, различающиеся по литологическому составу карстующихся пород, где автор «большим карстом» называет явления в карстующихся породах: известняках, мелу, гипсах, а «малым карстом» – карстовые явления в глинистых и лессовых отложениях. В 1941 итальянский исследователь Г. Флорида опубликовал исследование: "Un particolare fenomeno pseudocarsico manifestato algune argile" [5]. В 1947 году Н. А. Гвоздецкий рассматривая подобные явления, рекомендовал использовать термин "псевдокарст", правильно указав, что это реальный процесс, а не "псевдо". Он, в то время, также указывал, что «не придает ему значения научного термина, а лишь подчеркивает, что данное явление коренным образом отличается по своей природе от типичного карста» [6, с.58].

После 1950-ых выражение псевдокарст, прежде всего распространенного в спелеологических исследованиях в Центральной Европе [7 и др.]. Авторы отмечают, что основное отличие псевдокарста от карста – отсутствие карстующихся пород, хотя формы рельефа как подземные, так и поверхностные одинаковы (исключение составляет полное отсутствие в псевдокарстовых полостях сталактитов, сталагмитов и сталогнатов характерных для рас-

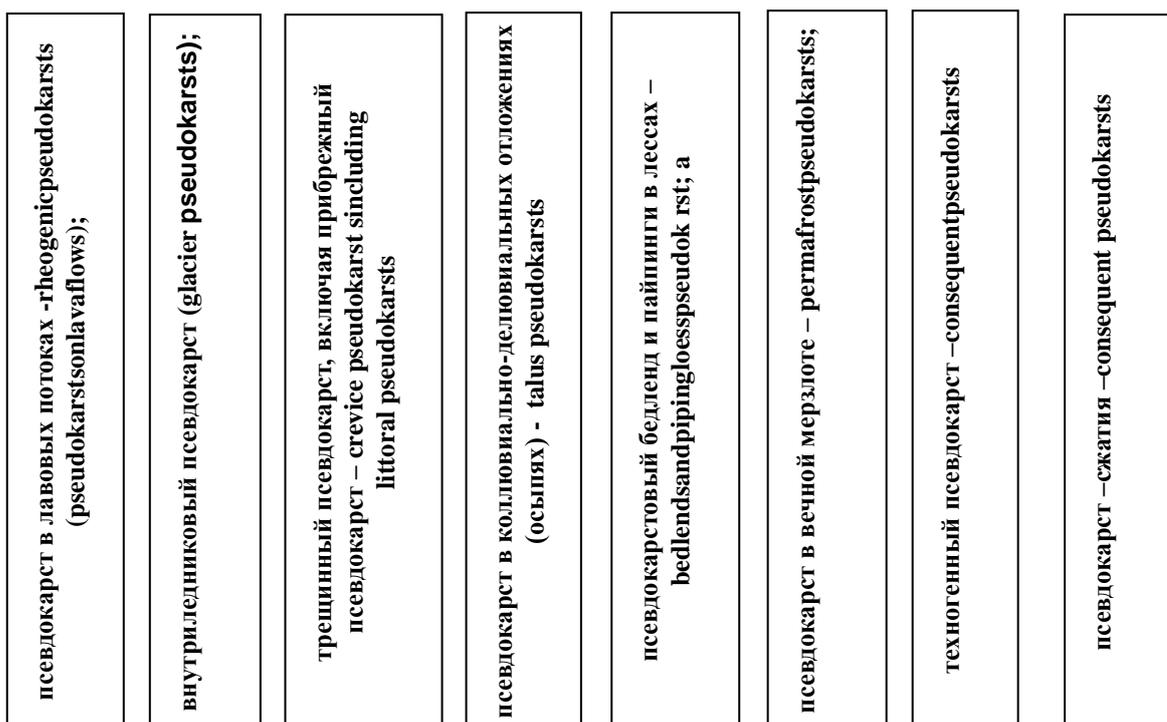
творимы пород). В 1950 г. Ч.Кукла [8] публикует на английском языке доклад о пещерах в песчаниках Чехии. Ч.Кунский обсуждает типы псевдокарстовых пещер в известных журналах на английском языке [9]. Сложность в обозначении этого явления определенным термином заключается в том, что комплекс форм, сходных с формами карста, но имеющих иной генезис, можно наблюдать в ледниках, в лессовых породах, глинистых и песчаных отложениях, в изверженных породах и др.

Е.Н.Иванова и др., [10] говорят о суффозионно-карстовых процесса в почвах Кара-Калпакской АССР в дельте Аму-Дарьи. Однако, П.М.Земский, описывая эти же процессы при исследованиях почв Кара-Калпакской АССР в дельте Аму-Дарьи уточняет, что карстующихся пород под вышележащими нет [11]. Этим он подтверждает в своей работе описанные И.П.Беловым аналогичные явления в том же районе [12]. П.М.Земский достаточно подробно описывает механизм проникновения воды по ходам корней растений и, главным образом, по ходам саксаула и землероев через верхнюю легкосуглинистую и супесчаную почвенную толщу до трещиноватых иловато-пылеватых плотных глинистых отложений, где растекается по трещинам. В результате вокруг корней растений и землероев происходит размыв, вынос частиц в нижние горизонты и образуются подземные ходы. П.М.Земский пишет в заключении, что образование внутри почвы подземных ходов происходит за счет размывания трещин в иловато-пылеватых отложениях [11].

Такая точка неопределенности была принята в отечественной литературе вплоть до начала 90-х годов. Начало нового этапа в изучении псевдокарста положило совещание по проблемам псевдокарста, прошедшее в 1992 году в Перми, на котором присутствовали и выступали В.Н. Андрейчук, Г.Н. Дублянская, В.Н. Дублянский и многие другие [13,14].

В 1997 году на 12-ом Международном Конгрессе по Спелеологии в Ла-Шо-де-Фоне (Швейцария) был организован комитет по изучению псевдокарста. Это явилось отправным моментом. Стали проходить регулярные международные псевдокарстовые конгрессы: Бразилия 2001, Греция 2005, Италия 2008, Италия 2012, и др. В 1997г на 12-ом Международном конгрессе ВМС (IUS) по итогам рабочей сессии, была принята следующая классификация псевдокарста [15], которую мы представим в виде диаграммы:

## Виды псевдокарста (types pseudokarst)



Автор, изучая псевдокарстовые процессы на протяжении последних лет, дополнил и расширил данную классификацию. Изучая территорию Крымского полуострова автор совместно с коллегами пришли к выводу о достаточно широком развитии как уже описанных в диаграмме форм псевдокарста (прибрежный, лессовый, техногенный и др.), так и вновь выделенных [16,17]. Однако, в литературе, псевдокарстовые процессы Крымского полуострова, до настоящего времени, освещены недостаточно, хотя существуют отдельные работы [13]. Отсутствие должного внимания и непонимание механизма, причин и скорости развития этого процесса может привести в ближайшем будущем к разрушению уже существующих сооружений и может вызвать формирование оползней-потоков в зонах активного рекреационного освоения. Исследователи приводят пример развития псевдокарста на трех участках юго-восточной части Крыма (район Судакской бухты и мыса Меганом). На первом участке псевдокарстовые явления развиты в коренных отложениях, представленных алевролитами и аргиллитами среднеюрского возраста (так называемый, флиш средней юры). Встречены как поверхностные, так и подземные формы псевдокарста. Авторами, на участке, описана пещера имеющая двухэтажное строение, протяженность которой более 12 м. И это в ритмично переслаивающихся аргиллитах и алевролитах! Что парадоксально! Встречены подземные полости объемом более 10 м<sup>3</sup> сформированные в сильно дробленных аргиллитах (размер обломков, как правило, изометричной формы от 1 до 20см<sup>3</sup>). На втором участке - в верхнечетвертичных делювиально-пролювиальных лессовидных суглинках мощностью до 20м, где протяженность пещер достигает 25м, а поражение массива псевдокарстовыми ходами и полостями приводит к формированию трещин-заколов в верхней части склонов, что может привести к смещению достаточно крупных блоков пород. На третьем – в аллювиально-пролювиальных отложениях верхнечетвертичного и голоценового возраста до глубины 8 м, уходящих тоннелями и расширенными ходами под основания уже построенных сооружений.

В начале статьи сказано, что отличие псевдокарста от карста в отсутствии карстующихся пород. Однако, автором с коллегами встречено и описано на юго-западе Крымского полуострова псевдокарстовое поле на котором развиты исключительно карстующиеся породы (органогенные неогеновые известняки). С поверхности создается иллюзия цепочки типичных карстовых провалов. Однако, при полевых исследованиях 2016-2018 гг. были обнаружены входы в многочисленные техногенные выработки достаточной протяженности и площади. Глубина прохода в выработки составляла многие десятки метров. Площади сформированных в результате экскавации плотных известняков тысячи м<sup>2</sup>. Высота техногенных пустот от 1,5 до 2,2м. Провалы диаметром до 15 м и глубиной до 3м. Иногда они сдвоены, нередко строены или представлены цепью провалов в количестве до 8. Нередко на исследуемой площади встречены одиночные провалы, практически идеальной круглой формы [17].

Отдельно остановимся на лессовом псевдокарсте, исследованием, которого автор занимался с 1981г. Лессовый псевдокарст - результат гидромеханического, гравитационного, биологического и физико-химического зонального разрушения недоуплотненных лессовых пород при их избыточном (как правило, техногенном) увлажнении, приводящий к образованию форм рельефа очень напоминающих типичные карстовые (пещеры, провалы, воронки, колодцы, овраги, цирки и др.) [18]. Подобный процесс характерен лишь для лессовых пород, т.е. для пород с особым составом и свойствами, распространенных в ландшафтах определенного типа.

Отдельные исследователи иногда рассматривают просадки, лессовый псевдокарст, образование степных блюдечек и западин как разновидности просадочного процесса [19,20 и др.]. Однако, блюдца и поды, как правило, являются унаследованными формами рельефа, в которых были условия увлажнения, которые способствовали более плотному сложению частиц лессовой породы [21]. Медленное, площадное повышение влажности лессовых пород при их высокой пористости, вызывает просадку и исключает развитие псевдокарста. Замачивание основания будущего сооружения до начала строительства продолжается десятки суток, с постоянным контролем качества замачивания и изменением плотности грунта. Если же замачиваемый котлован имеет трещи-

ны, ходы землероев и корней ксерофитной растительности или другие полости, в которые возможно проникновение воды, начинается мгновенное развитие лессового псевдокарста. Скорость развития лессового псевдокарста настолько велика, что известны случаи, когда за несколько суток псевдокарстом поражается огромные площади. В Западной ветви Надтеречного канала (Восточное Предкавказье) за несколько суток провальные формы в виде воронок и провалов диаметром до 1,5 метров ушли по нормали к оси канала на 900 метров от его бровки [22]. Автор наблюдал формирование псевдокарстового оврага длиной более 30 метров, шириной 8 метров и глубиной более 5 метров в результате утечек из водоводных бетонных лотков в Юго-Западном Таджикистане в течении 1,5 суток.

Непонимание этого процесса привело к ошибочным решениям при подготовке оснований для взрывоопасных объектов, очистных сооружений и жилья для крупнейшего в мире Прикумского завода пластмасс в г. Буденновске. Здесь, при предстроительном замачивании котлованов с дренажными скважинами, повсеместно образовались провалы и воронки в просадочных грунтах мощностью до 50 м. Это привело к большому (в 3-4 раза) перерасходу воды, дефицитной в степных районах, и задержке строительства государственных объектов.

Лессовый псевдокарст привел к аварийным ситуациям при эксплуатации объектов крупнейшего в России Большого Ставропольского канала (БСК), получил развитие на обрывистых берегах р. Терек на территории Чечено-Ингушетии. Этот скрытый процесс часто осложняет и особенно опасен при устранении просадочности мощных лессовых толщ предварительным замачиванием котлованов. Поэтому строители часто отказываются от «нормативных» методов устранения просадочности замачиванием лессовых грунтов.

Для развития лессового псевдокарста необходимо вертикальное турбулентное движение потока воды, которое способствует отрыву частиц лессовой породы и выносу их в нижние горизонты лессов, вызывая формирование подземных псевдокарстовых полостей, а на поверхности массива осадку и уплотнение. Вынос частиц лессовой породы происходит до тех участков, где преобладает слабонаклонное ламинарное движение воды, к месту разгрузки, которым, как правило, является тальвег более крупного водотока. При переходе движения потока воды в слабонаклонное, энергия резко уменьшается и в месте разгрузки частицы грунта укладываются с более высокой плотностью в виде небольшого конуса выноса. Как правило, объем вынесенного материала несравнимо меньше объема образующихся в результате псевдокарствования пустот. В отличие от просадки, первоначальная площадь развития лессового псевдокарста небольшая.

Лессы - являются на сегодняшний день единственными геологическими образованиями на Земле достаточной мощности способными к проявлению такого стремительного (быстротечного) процесса как лессовый псевдокарст. Физико-механические свойства лессовых пород являются функцией генезиса и современных условий существования породы. Свойствами породы определяется стоимость, сроки и целесообразность современного строительства. Так, при строительстве на просадочных грунтах, стоимость повышается до 10% в сравнении с непросадочными, а строительство на площадях, пораженных псевдокарстом, увеличит эту цифру в несколько раз. Более того, для надежного проектирования, строительства и эксплуатации сооружения помимо существующих свойств породы, необходимо предвидеть их изменения в процессе хозяйственной деятельности человека. Нецивилизованный сброс излишков воды приводит к развитию псевдокарста даже спустя десятилетия после ввода объекта в эксплуатацию. При рассмотрении инженерно-геологических свойств лессовых пород необходимо учитывать основные факторы, оказывающие влияние на свойства лессов [18].

В настоящее время в России и в мире отсутствуют специальные методические рекомендации о проектировании и строительстве зданий и сооружений на территориях, пораженных псевдокарстом, хотя основой для них могут служить отдельные норматив-

ные документы, разработанные для карстоопасных районов [23,24,25 и др.]. В тоже время существуют отдельные работы, посвященные этой проблеме [26,27 и др.].

В настоящее время человечество, вооруженное техникой, провоцирует деградацию естественных ландшафтов. Человек все сильнее преобразовывает верхние горизонты геологической среды, создавая для себя наиболее комфортные условия. Это способствует активизации такого грозного феномена как псевдокарст. При существующей техногенной нагрузке на лессовые породы, где активно развивается псевдокарст, вполне вероятно, что через несколько поколений человечество уже не увидит типичных лессовых массивов с характерными для этой породы свойствами!

### Литература

1. Геологический словарь, т.2, 2011г.
2. Knebel W. von. Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene/Die Wissenschaft. Sammlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Monographien. Heft 15. Braunschweig: Friederich: Vieweg und Sohn,1906.
3. Halliday W. R. 2007. Pseudokarst in the 21 st century. - Journal of Cave and Karst Studies.69. s.103-113.
4. Саваренский Ф.П. Инженерная геология.2-е изд. М.: ГОНТИ, 1939. 488 с.
5. Floridia, G. 1941. Un particolare fenomeno pseudocarsico manifestato da alcune argile. Bolletino della Societa di Sciencio Naturale ed Economiche di Palermo, 23:10–19.
6. Гвоздецкий Н.А. Карст. М., 1954,361 с.
7. Kosack, H.-P. 1952. Die Verbreitung der Karst- und Pseudokarsters cheinungen über die Erde. Petermanns Geographische Mitteilungen, 96 Jahr, 1st Q.: 1ff. witzerland: Speleo Projects: p.107.
8. Kukla, J. (1950): Pseudokrasove jeskynci u Loktu na Slovensku - Ceskoslovensky kras (vol. 3), Brno, p. 274-278.
9. Kunsky, J.1957. Termomineral karst and caves of Zbrasov, northern Moravia. Sbor. Cs.Spol.zemepis ., 62, 4:306-351.
10. Иванова Е.Н., Герасимов И.П., Неуструев С.С., Кнорриг-Неуструева О.Э. Почвенные и ботанико-географические исследования в Кара-Калпакской Автономной области. Тр. почв. Инст-та АН СССР. Т.3-4. 1930. С. 138-154.
11. Земский П.М. Просадочные почвы и почвообразующие породы в орошаемых районах Средней Азии. – Почвоведение, 1954, № 2, С. 13-24.
12. Белов И.П. Тр. Ин-та географ. АН СССР,1940, т.XXXV. Географические исследования в Туркмении в 1934 - 1935 гг. (Куня-дарья, Саракамыш, Приузбойские Кара-кумы). М., Л. Издательство Академии Наук СССР 1940г. 115с.
13. Андрейчук В.Н. Введение. Проблема псевдокарста. Тезисы докл. Совещ.г.Кунгур,1992. Пермь. 1992.С.3-6.
14. Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Понятие «псевдокарст» и его сущность// Проблема псевдокарста:Тез. Докл. Совещ..Кунгур, 15-16 дек. 1992. Пермь, 1992.С. 6-9.
15. Halliday W. R. 2007. Pseudokarst in the 21 st century. - Journal of Cave and Karst Studies.69. s.103-113.
16. Лаврусевич А.А., Брюхань Ф.Ф., Лаврусевич И.А., Хоменко В.П. Псевдокарстовые явления в четвертичных и коренных отложениях юго-востока Крымского полуострова//Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С. 15-18.
17. Лаврусевич А.А., Лаврусевич И.А., Алешина Т.С., Аллабергенава Э.М., Кузнецова О.Г. Опасность развития техногенного псевдокарста (на примере участка в юго-западной части Крымского полуострова). Мат-лы X междунар. научн.-практич. конф. по проблемам снижения природных опасностей и рисков. М. Геориск 2018. Т.1.С.329-333.
18. Лаврусевич А.А., Крашенинников В.С., Лаврусевич И.А. Лёссовый псевдокарст и опыт укрепления лессовых массивов и откосов искусственными посадками не-

которых растений (на примере лессового плато КНР, провинции Ганьсу и Шеньси)// Инженерная геология. №1, 2012. С.48-58.

19. Кочетов Н.И. Просадочные формы рельефа в Западном Предкавказье// Геоморфология, 1978, №4, С.72.

20. Лисицин К.И. О деформациях суглинистых грунтов Предкавказья в связи с вопросом об образовании степных блюдц. -Материалы Сев.-Кавказ. Геологоразведочного треста. Вып.1. Новочеркасск, 1932. С.19.

21. Кригер Н.И., Гранит Б.А., и др. Опыт комплексного изучения лессового псевдокарста для строительных целей (на примере окрестностей Алма-Аты). // Комплексные исследования в инженерных изысканиях для строительства. ПНИИИС., Сб. научн. Трудов. М.: Стройиздат, 1982. С.50-63

22. Запороженко Э.В. Суффозионные деформации в лессовых породах Предкавказья // Вопросы строительства гидротехнических сооружений на просадочных грунтах. Баку. 1969. С.108-115.\

23. СП 11-105-97, ч. II. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов.2000.

24. СНиП 22-02-2003. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. 2004.

25. Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. Нижний Новгород. 2012.140с.

26. Лаврусевич А.А., Хоменко В.П. Инженерная защита территорий, пораженных лессовым псевдокарстом // Вестник МГСУ. №10, 2012. С. 191-199.

27. Лаврусевич А.А., Хоменко В.П., Лаврусевич И.А. Проблемы строительного освоения пораженных псевдокарстом лессовых массивов //Промышленное и гражданское строительство - М.-2012. -№11. -С.8-10.

## ОЦЕНКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПЛОЩАДКИ АЭС И ЕЕ ОКРЕСТНОСТЕЙ

Пендин В.В.<sup>1</sup>, Гусельцев А.С.<sup>3</sup>, Фоменко И.К.<sup>1</sup>, Зеркаль О.В.<sup>2</sup>,  
Сироткина О.Н.<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе», г. Москва; <sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», г. Москва; <sup>3</sup>ФБУ «НТЦ ЯРБ», г. Москва)

**Аннотация:** в статье рассматривается оценка суффозионной опасности площадки объекта атомной промышленности и его окрестностей. На первом этапе было выполнено районирование территории размещения атомной электростанции по суффозионной опасности, на втором – непосредственная оценка опасности развития суффозионного процесса под фундаментами возводимых зданий и сооружений. Районирование территории по суффозионной опасности выполнено средствами ARCGIS на основе карты плотности проявлений суффозионных процессов. Локальная оценка суффозионной опасности выполнена на основе методики ВНИИГ и пространственного анализа неоднородности песков, залегающих в верхней части геологического разреза промплощадки.

**Ключевые слова:** суффозия, районирование, опасность, анализ, неоднородность гранулометрический состав, пески.

**Введение.** В последние годы суффозия начинает привлекать все более пристальное внимание широкого круга специалистов, изучающих взаимодействие человека с геологической средой. Несмотря на то, что суффозионные явления встречаются практически повсеместно, в силу ряда объективных и субъективных причин роль этого процесса длительное время недооценивалась. Сейчас отношение к проблеме инженерно-геологического изучения суффозии начало заметно меняться в связи с необходимостью хозяйственного освоения суффозионно-опасных территорий и с резко возросшей техногенной активизацией процесса [9].

В термин «суффозия» в настоящее время различные исследователи вкладывают неоднозначные понятия. Впервые этот термин был предложен в конце девятнадцатого века А.П.Павловым. Слово суффозия возникло от латинского «suffodio» – подкапывать. А.П.Павлов под суффозией понимал разрушение и растворение минеральных частиц подземными водами [1,2,10]. В настоящее время существуют две основные трактовки понятия суффозионных процессов: включающее или исключаящее из понятия суффозии выщелачивание растворимых компонентов горных пород. Сторонники широкого понимания термина «суффозия» выделяют среди суффозионных процессов так называемую химическую суффозию. Такой подход к пониманию термина суффозия критикуется в работах В.Д.Ломтадзе (1977) [3], который считает, что выщелачивание солей – это коррозионный процесс и никакого отношения к суффозии не имеет. Отсюда В.Д. Ломтадзе делает вывод, что говорить о химической суффозии неправомерно [2].

В 2003 году вышла в свет монография В.П.Хоменко[9], в которой автор дал всеобъемлющую характеристику процесса суффозии, как одного из наименее изученных опасных экзогенных геологических процессов. В своей монографии В.П.Хоменко приводит следующее определение процесса суффозии: «разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и цементированных обломочных горных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов». Нам кажется, что это определение наиболее полно отражает процесс суффозии.

Результатом суффозионного процесса, являются подземные и поверхностные эрозийные и аккумулятивные формы – полости, зоны разуплотнения, воронки, ниши, конуса выноса и т.д. [1].

В соответствии с требованиями СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства» [7] при существующем или ожидаемом развитии опасных геологических процессов, к которым, согласно СП 115.13330.2011 «Геофизика опасных природных воздействий», [8], относится и суффозия, необходимо их качественное и количественное прогнозирование.

Целью настоящей работы является оценка суффозионной опасности площадки размещения объекта атомной промышленности и ее окрестностей. Для ее достижения на первом этапе было выполнено районирование территории размещения атомной электростанции (АЭС) по суффозионной опасности, на втором – непосредственная оценка опасности развития суффозионного процесса под фундаментами возводимых зданий и сооружений.

**Общие сведения об объекте исследований.** Площадка АЭС расположена в 15 км к северо-востоку от г. Волгодонск и в 8 км к западу от ст. Жуковская (рис. 1).



**Рис. 1.** Обзорная схема территории исследований (круги – радиусы соответственно 10 км и 3 км)

В геоморфологическом отношении площадка приурочена к северному макросклону аккумулятивно-денудационной равнины Доно-Сальского водораздельного склона. Рельеф площадки имеет плоскоравнинный характер, с незначительным уклоном ( $i = 0,007$ ) в сторону водохранилища. Перепад абсолютных отметок дневной поверхности изменяется незначительно – от 30,08 м до 39,85 м.

В инженерно-геологическом отношении площадка АЭС достаточно четко разделяется на два участка: северо-западный и юго-восточный.

Первый расположен в пределах II надпойменной террасы р. Дон и примыкает к водохранилищу полосой 350-500м. Особенность геологического разреза здесь составляют аллювиальные ( $aQ_{III}$ ) отложения, залегающие между имеющимися региональное распространение эолово-делювиальными суглинками и майкопскими глинами.

Второй участок промплощадки приурочен к нижней, северо-западной части макросклона Доно-Сальского водораздела. Здесь под эолово-делювиальными образованиями, общей мощностью 5-23м, залегают либо делювиальные ( $dQ_1$ ) суглинки и глины, либо песчаные и песчано-глинистые отложения ергенинской свиты ( $N_2^e$ ). Миоценовые отложения ( $N_2^e$ ), мощностью 4-22м, подстилаются толщей майкопских глин, мощность которых колеблется от 27 м до 76 и более метров.

Инженерно-геологические условия промплощадки осложняются наличием двух водоносных горизонтов, образующихся вследствие несовершенства изолирующих водоупоров, единый водоносный комплекс. Оба горизонта разгружаются в водохранилище.

При обосновании безопасности рассматриваемой площадки были проанализированы следующие негативные геологические и инженерно-геологические процессы – склоновые процессы, переработка берегов водохранилища, просадочные процессы, процессы пучения, суффозионные процессы, подтопление и заболачивание [4].

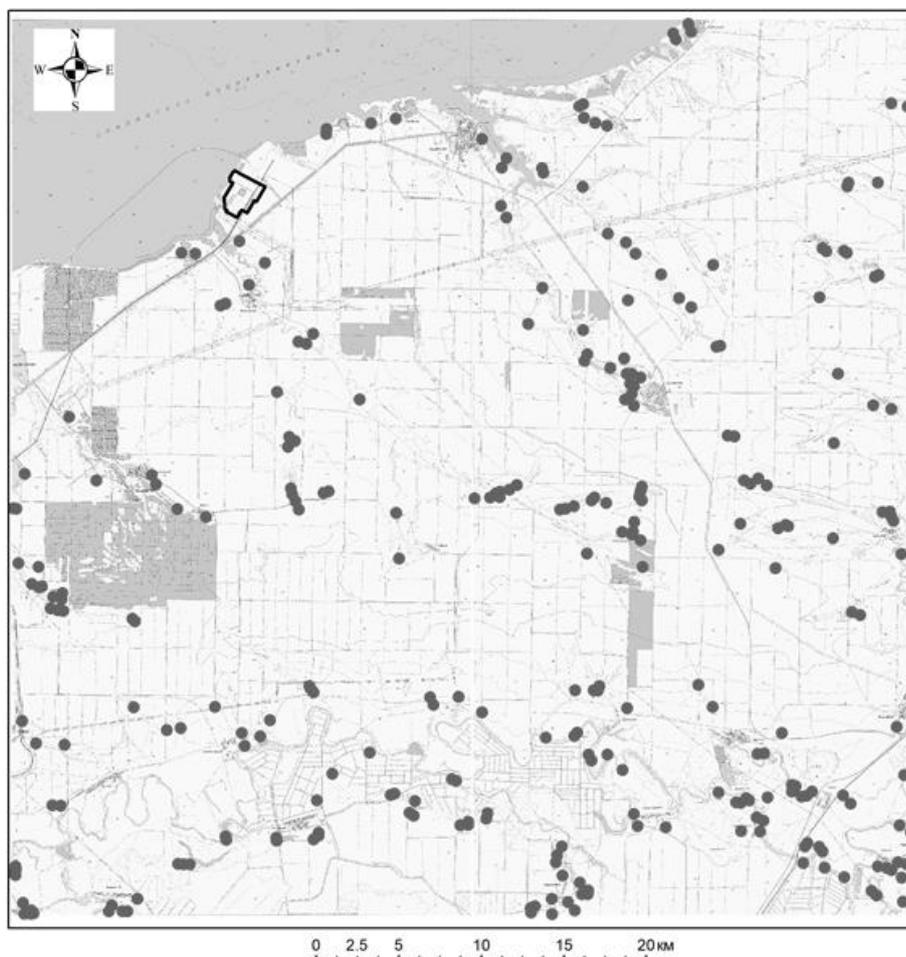
Анализ имеющихся данных показал, что наибольшую опасность для зданий и сооружений АЭС могут иметь именно суффозионные процессы. Согласно ранее выполненным инженерным изысканиям «развитие суффозионных процессов характерно для засоленных грунтов, при фильтрации через них воды. Степень засоленности эолово-делювиальных суглинков зоны аэрации достигает 5-6%. Инженерно-геологическими изысканиями установлено, что они являются суффозионно-устойчивыми при скоростях движения воды не превышающих 0,035 м/сут. При существующих естественных напорных градиентах грунтовых вод (0,003-0,005) и фильтрационных свойствах пород ( $K_f = 0,1-0,4$  м/сут) такие скорости не достигаются. Однако если учесть, что при утечках из водонесущих коммуникаций, а также их авариях, возможно формирование куполов растекания с первоначальными напорными градиентами более 1, то развитие на локальных участках суффозионно-провальных воронок исключить нельзя. Подобные явления достаточно часто отмечались в пределах территории г. Волгодонска» [4]. Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что сооружение энергоблоков АЭС происходило под защитой глубинного водопонижения, сопровождавшегося не только значительными объемами откачиваемой воды и соответствующими градиентами потока грунтовых вод, но и, что особенно важно, весьма высокими концентрациями растворенных в них и выносимых в пруд-охладитель солей.

Представляется необоснованным рассмотрение в рамках инженерных изысканий только химической суффозии, так, как и механическая суффозия в песках, за счет выноса частиц мелкодисперсной фракции, представляет, на наш взгляд, наиболее серьезную опасность на участке промплощадки, приуроченной к северо-западной части макросклона Доно-Сальского водораздела.

**Районирование территории размещения площадки АЭС по суффозионной опасности.** Научно-обоснованный прогноз реакций литосферы на различные виды искусственных взаимодействий и составление на этой основе карты суффозионной опасности даёт возможность правильно спланировать мероприятия по управлению состоянием региональных, локальных и элементарных литотехнических систем (ЛТС), обосновать пространственно-временную структуру мониторинга ЛТС, создать инженерно-геологическую основу для разработки плана освоения территорий[2]. За последние годы были разработаны различные методы комплексного анализа геологической среды с целью районирования территорий по опасности возникновения геологических процессов. Так как большинство методов требуют комплексного анализа значительных массивов данных, все большее значение при решении подобных задач приобретают геоинформационные системы (ГИС) [6]. В настоящей работе для проведения районирования территории по суффозионной опасности был использован программный комплекс ARCGIS.

С целью районирования территории по суффозионной опасности, с топографической карты масштаба 1:50000, с привлечением информации по дистанционному зонди-

рованию (ДДЗ) территории были вынесены возможные участки проявления процесса суффозии (рис. 2).



**Рис. 2.** Участки проявления суффозионных процессов

Следует отметить, что, несмотря на то, что рельеф как непосредственно площадки, так и прилегающей территории был существенно техногенно изменен при длительном сельскохозяйственном освоении, на материалах дистанционного зондирования достаточно хорошо прослеживается наличие на прилегающих территориях "полей" суффозионно-просадочных блюдцев, которые ранее (до запашки), широко были развиты на дневной поверхности.

На основе информации, полученной при тематической обработке данных дистанционного зондирования, была построена карта плотности проявлений суффозионных процессов, которая стала основой для районирования территории по суффозионной опасности. Для представления результатов оценки степени суффозионной опасности был использован принцип «светофора». В соответствии с этим вся территория была разделена на зоны:

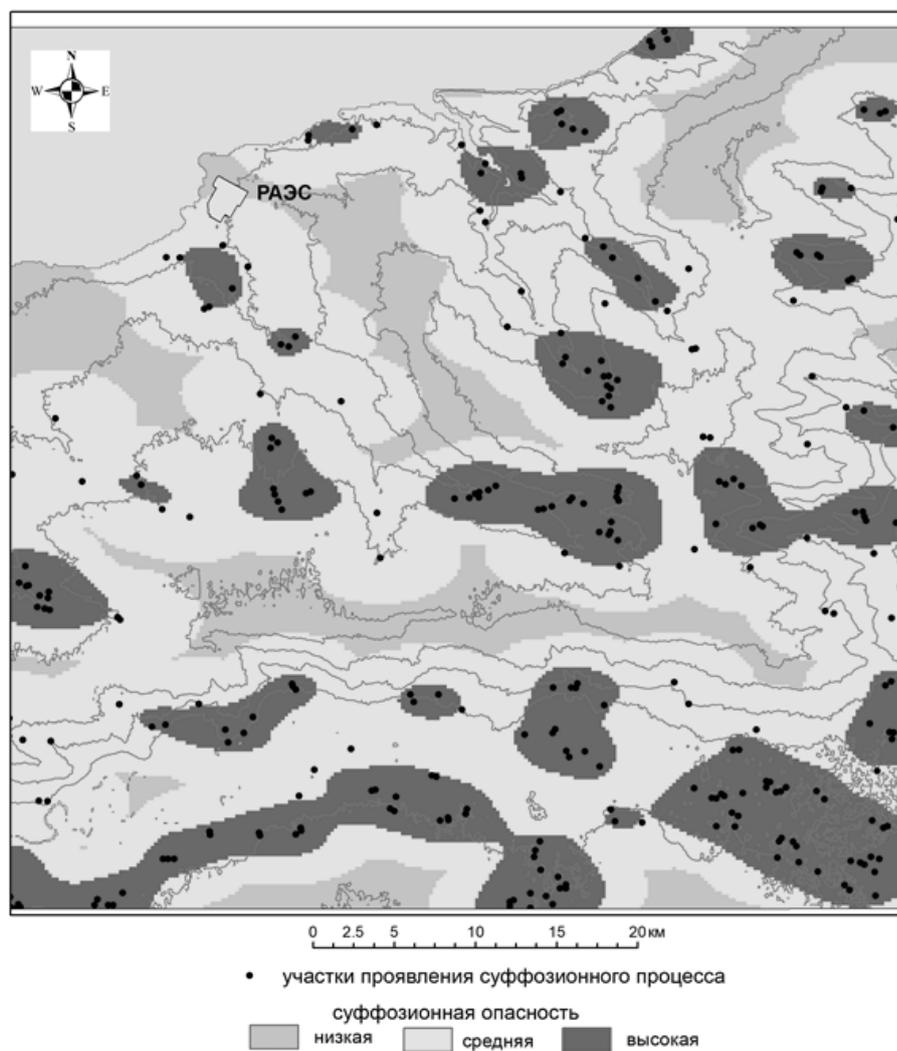
Первая зона – характеризуется высокой суффозионной опасностью.

Вторая зона – характеризуется средней суффозионной опасностью.

Третья зона – характеризуется низкой суффозионной опасностью.

Разделение между зонами было выполнено на основе метода естественных границ. В методе естественных границ классы основаны на естественном группировании данных. Границы классов определяются таким образом, чтобы сгруппировать схожие значения и максимально увеличить различия между классами.

Итоговая карта суффозионной опасности приведена на рис.3.



**Рис. 3.** Карта суффозионной опасности

Анализ карты суффозионной опасности (с учетом информации с топографической карты масштаба 1:50000) позволяет сделать вывод о том, что проявления суффозионных процессов приурочены к местам повышенного градиента подземных вод как естественного – борта оврагов, так и техногенного – водозаборы (например, артезианские скважины) происхождения. Согласно результатам районирования (рис.3), второй участок промплощадки, приурочен к нижней, северо-западной части макросклона Доно-Сальского водораздела, попадает в зону средней суффозионной опасности. Однако, с учетом повышенного техногенного воздействия, связанного, в первую очередь с понижением уровня подземных вод в пределах площадки в период принудительного водопонижения и с растворением солей в грунтах площадки, суффозионные процессы должны были быть техногенно активизированы.

**Локальная оценка суффозионной опасности.** Общая оценка механической суффозионной устойчивости песков изучаемой площадки производилась по методике ВНИИГ [5]. При этом принималось, что без ущерба для конструкции сооружений из грунта могут быть вынесены самые мелкие частицы, количество которых не превышает 3-5% по массе, т.е. критерий может быть записан в виде:

$$d_{c_{i \max}} < d_3 \div d_5, \quad (1)$$

$$d_{c_{i \max}} = 0,77d_{0 \max}, \quad (2)$$

где  $d_{c_{i \max}}$  – максимальный размер частиц, которые могут быть вынесены фильтрационным потоком в результате суффозии;

$d_{0 \max}$  – диаметр максимальных фильтрационных пор в грунте, определенный по формуле:

$$d_{0max} = 00,455k\sqrt[6]{C_u}ed_{17}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте

$$k = 1 + 0,05 C_u, \quad (4)$$

$$C_u = d_{60}/d_{10}, \quad (5)$$

где  $C_u$  – степень неоднородности грунта,

$d_{60}$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{17}$  – диаметр частиц соответственно 60, 10, 17 процентной обеспеченности (диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится (по массе) соответственно 60, 10, 17% частиц);

$e$  – коэффициент пористости.

Результаты расчета по выражениям 1–5 сведены в табл. 1.

Из результатов выполненных расчетов, приведенных в таблице 1, следует, что все разности песчаных грунтов, развитые в верхней части геологического разреза в пределах промплощадки АЭС, являются потенциально суффозионно-неустойчивыми.

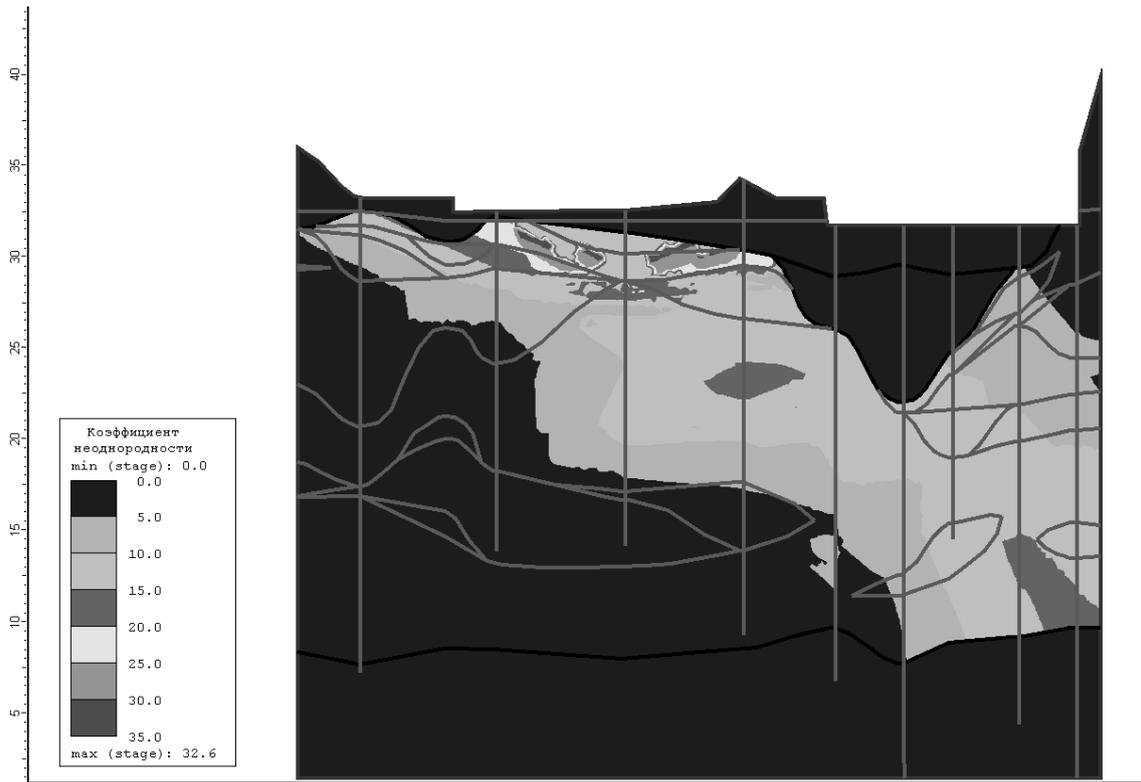
**Таблица 1**

**Оценка суффозионной устойчивости песчаных грунтов**

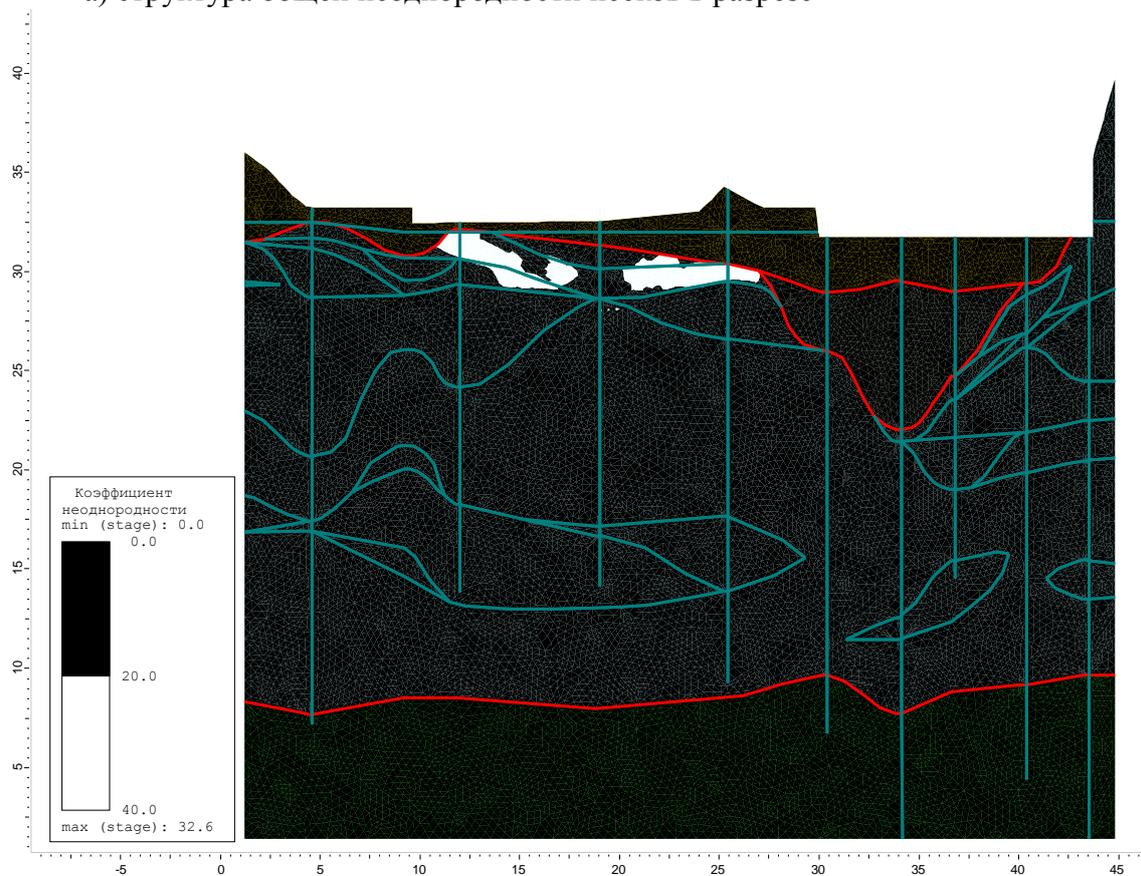
Описание грунта	$d_{60}$	$d_{10}$	$C_u = d_{60}/d_{10}$	$k$	$e$	$d_{17}$	$d_{0max}$	$d_{cimax}$	$d_5$
		мм							
Песок пы- леватый, средней плотный		0,006	11,67	1,58	0,670	0,0085	0,458	<b>0,353</b>	<b>&lt;0,005</b>
Песок пы- леватый, плотный		0,00125	52	3,6	0,525	0,0075	1,26	<b>0,97</b>	<b>&lt;0,005</b>
Песок мел- кий, сред- ней плот- ный		0,085	1,545	1,077	0,641	0,06	0,306	<b>0,236</b>	<b>0,01</b>
Песок мел- кий, плот- ный		0,085	1,545	1,077	0,520	0,06	0,296	<b>0,228</b>	<b>0,015</b>
Песок средний		0,06	3,33	1,17	0,464	0,065	0,38	<b>0,28</b>	<b>0,05</b>
Песок крупный		0,07	7,14	1,357	0,464	0,08	0,495	<b>0,38</b>	<b>0,06</b>

Для непосредственной оценки опасности развития суффозионных процессов под фундаментами возводимых зданий и сооружений был выполнен пространственный анализ неоднородности гранулометрического состава песков, залегающих в верхней части геологического разреза промплощадки АЭС. В качестве метода интерполяции был использован метод Чага, который позволяет рассчитать значения параметра в грунтовом массиве между точками, в которых определено значение того или иного параметра. Результаты выполненного анализа представлены на рис. 4а, из которого хорошо видно, что для рассматриваемой территории характерно развитие песков существенно неоднородного состава.

Основным условием, необходимым для развития суффозионного процесса, является наличие суффозионно-неустойчивых грунтов. К последним могут быть отнесены грунты, у которых коэффициент неоднородности гранулометрического состава –  $C_u = d_{60}/d_{10} > 20$  [2].



а) структура общей неоднородности песков в разрезе



б) оценка суффозионной опасности

**Рис. 4.** Пространственный анализ неоднородности состава песков, залегающих в верхней части геологического разреза промплощадки АЭС

Анализ неоднородности песков (рис. 4б) показывает, что наиболее суффозионно-опасной (коэффициент неоднородности более 20) является верхняя часть разреза. Таким образом, неконтролируемое понижение уровня подземных вод, как в результате резкой сработки уровня водохранилища, так и при активном выполнении водопонижения УГВ, могло выступить в качестве триггера активизации суффозии и, как следствие, стать причиной дополнительной осадки фундаментов зданий и сооружений, размещенных на площадке.

**Заключение.** Изучение суффозионных процессов проводится уже более ста лет. К настоящему времени выработано представление о сущности суффозии, даны определения этого термина. Одно из определений, наиболее полно отражающих природу процесса суффозии, можно найти в работах В.П.Хоменко, безусловно являющегося одним из ведущих специалистов по изучению суффозионных процессов.

Интенсификация антропогенной деятельности во многих случаях сопровождается вовлечением в хозяйственный оборот территорий, для которых существует опасность развития суффозионных процессов. Одним из примеров недоучета особенностей инженерно-геологических условий в части оценки возможности развития суффозионных процессов, является промплощадка рассматриваемой АЭС. Дополнительный анализ суффозионной опасности, выполненный с привлечением ДДЗ, методов инженерно-геологического районирования, показал наличие на рассматриваемой территории условий для активизации развития суффозионных процессов, что безусловно, требует учета при освоении территории. Площадка АЭС по результатам районирования находится на границе низкой и средней суффозионной опасности. Локальная оценка суффозионной опасности показала, что наиболее суффозионно-опасной (коэффициент неоднородности более 20) является верхняя часть разреза.

### Литература

1. Аникеев, А. В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. - М: РУДН, 2017. 328с.
2. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. Инженерная геодинамика. – М.: КДУ, 2007. 327 с.
3. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. - Л.: Недра, 1977. 479с.
4. Отчет по обоснованию безопасности. Ростовская АЭС. Энергоблок №4. АО НИАЭП, 2016.
5. П 49-90 (ВНИИГ) Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость
6. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. - М.: ЛЕНАНД, 2015. 230 с.
7. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ.
8. СП 115.13330.2011. Геофизика опасных природных воздействий.
9. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. - М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
10. Хоменко В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. - М.: Наука, 1986. 98с.

## ОПЫТ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПРОЦЕССАМИ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ И ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ИХ МОНИТОРИНГА

Казначеев П.А., Камшилин А.Н.

(Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва)

**Аннотация.** В статье представлен опыт наблюдения за образованием небольших провалов грунта в городских условиях, произошедших несколько раз в 2013-2016 гг. в одних и тех же местах. Отмечена разница в развитии провала на заасфальтированной и не заасфальтированной территориях. Рассмотрены методы мониторинга процессов провалообразования в сложных городских условиях.

**Ключевые слова:** провалы грунта, мониторинг, город, заасфальтированные территории.

Образование провалов грунта представляет серьезную угрозу для безопасности сооружений и их строительства, особенно – в городских условиях. Наличие разветвленной сети коллекторов, ограниченность поверхностного стока и повышенная активность стекающих растворов создают благоприятные условия для процессов суффозии и растворения грунтовых материалов [1]. Несмотря на непосредственное проживание человека в городских условиях, наблюдение за этими процессами затруднено тем, что скрыто от методов контроля искусственными покрытиями – асфальтом, насыпными подушками из привозного грунта и др. Предсказать развитие провала затруднительно, и большинство провалов обнаруживаются уже после выхода на поверхность и разрушения искусственного покрытия. Поэтому существенную ценность представляет опыт наблюдения за развитием таких провалов до их выхода на поверхность, а разработка методов мониторинга данной стадии провалообразования является актуальной задачей.

Проведено наблюдение за развитием двух провалов в городских условиях: от небольшого проседания грунта до выхода на поверхность. Особенностью наблюдаемых провалов являлось их неоднократное образование практически в одних и тех же местах, что явно говорит об образовании определенных, скрытых от непосредственного наблюдения суффозионных процессов. Один из провалов находился на заасфальтированной территории тротуара, другой – на не заасфальтированной территории газона на расстоянии 3-5 м от первого. На расстоянии 1-2 м от провала на газоне находился люк коллектора. Фотографии провалов на окончательной стадии развития, которую удалось зафиксировать, показаны на рис. 1. Впервые провалы были зафиксированы и сфотографированы весной 2013 года, визуальный мониторинг проводится непрерывно по настоящее время. Активное развитие провалов происходило в 2013-2016 гг., после чего состояние среды относительно стабилизировалось. Указанное место находится на востоке Москвы, в непосредственной близости от Измайловского лесопарка. По всей видимости, провалы обусловлены сложными гидрогеологическими условиями (подземные речки и сложные условия стока).

Из рис. 1 видно, что провалы представляют серьезную угрозу пешеходам. Размер провала на заасфальтированной территории составлял около 1.5 x 1.8 м (рис. 1а), размер провала на не заасфальтированной территории - около 1.5 м в диаметре (рис. 1б). При возникновении провалов таких размеров на проезжей части возможны серьезные автомобильные аварии, при возникновении на участке строительства возникает опасность для строительной бригады и строящегося сооружения.

Отличительная особенность провалов грунта в городских условиях, особенно на заасфальтированных территориях, состоит в том, что видимые проявления на определенном этапе могут быть незначительными, а при соответствующем внешнем воздей-

ствии (большая нагрузка, ударное воздействие) может резко образоваться провал. Например, после каждой засыпки провала на газоне достаточно быстро происходило новое заметное проседание грунта. После ремонта асфальтового покрытия тротуара там, где был провал на асфальте, новый асфальт проседал и ломался очень медленно. При этом, скорее всего, под асфальтом грунт разуплотнился достаточно быстро, как и в первом случае. При внешнем воздействии (например, проезде тяжелой строительной техники) асфальтовое покрытие может резко разрушиться.



**Рис. 1.** Пример образования провала грунта в городе на заасфальтированной (слева) и незаасфальтированной (справа) территории.

Поэтому для обеспечения безопасной хозяйственной деятельности в городских условиях, особенно высокой степени ответственности (строительство, эксплуатация сложных сооружений), актуальна задача разработки методов мониторинга состояния геологической среды, которые позволили бы отслеживать её небольшие изменения (разуплотнение грунта, образование пустот, не выходящих на поверхность и т.п.). Приведем краткий обзор геоэлектрических методов, которые могли бы использоваться для данных целей.

Активный геоэлектрический мониторинг (АГЭМ) предполагает искусственное возбуждение электрического поля в среде и такое размещение электрометрической установки, которое позволяет обеспечить максимальную чувствительность к наиболее интересующим нас изменениям. В зависимости от типа измерителя электрического поля, АГЭМ может быть построен на основе традиционных измерительных электродных пар [2] или на основе бесконтактных измерителей тока [3]. Первый вариант проще реализуется при использовании стандартной электроразведочной аппаратуры, но второй вариант позволяет существенно увеличить помехозащищенность за счет устранения контактных явлений. Размещение электрометрической установки, прежде всего, должно удовлетворять условию нулевого сигнала в исходный момент времени, когда производится установка аппаратуры. Отслеживание разностного сигнала позволяет обнаружить момент, когда геологические процессы существенно изменяют геоэлектрический разрез по сравнению с исходным состоянием. Второе условие для размещения электрометрической установки предполагает её максимальную чувствительность к тем изменениям среды, которые интересуют нас больше всего. Это может быть конкретно пространственная область, где подготавливается провал [4]. Теоретические исследования на модели процесса провалообразования показывают, что чувствительности современной аппаратуры достаточно для обнаружения подготовки провала на ранних этапах [5].

### Литература

1. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. - М.: ГЕОС, 2003.

2. Возможности регистрации подземных обрушений грунтов с помощью активно-го геоэлектрического мониторинга / В.П. Хоменко, А.Н. Камшилин, О.Р. Кузичкин, Е.Н. Волкова // Промышленное и гражданское строительство. - 2007. - № 11. - С. 12-14.
3. Геоэлектрические исследования процессов подготовки провалов грунта / Е.Н. Волкова, П.А. Казначеев, А.Н. Камшилин, В.В. Попов // Геофизические исследования. - 2013. - Т. 14, № 3. - С. 64-79.
4. Камшилин А.Н., Волкова Е.Н., Хоменко В.П. Способ геоэлектроразведки: патент РФ № 2426153 С1, кл. G 01 V 3/02. - Заявл. 07.04.2010. - Оpubл. 10.08.2011. - Бюлл. № 22. - 9 с.
5. Казначеев П.А., Камшилин А.Н., Хоменко В.П. Эквипотенциальный и токовый методы карстологического геоэлектрического мониторинга // Инженерные изыскания. - 2015. - № 9. - С. 32-39.

## ОПЫТ И ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОБВАЛЬНО-ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ МОРСКИХ ПОБЕРЕЖИЙ (НА ПРИМЕРЕ ХРЕБТА СЕМИСОМ, КРАСНОДАРСКИЙ КРАЙ)

Миرونюк С. Г., Ионов В. Ю.

*(Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва)*

**Аннотация:** рассмотрены версии образования крупных блоковых оползней на полуострове Абрау. Изучены условия строительства трубопровода методом микротоннелирования на участке развития оползней. Рассмотрены методы изучения оползней. Показаны трудности подготовки образцов для определения прочностных и деформационных свойств скальных пород. Продемонстрирована эффективность метода электротомографии при изучении оползней. Выполнен расчет устойчивости склона.

**Ключевые слова:** Черное море, побережье, землетрясения, оползни, трубопровод, микротоннель, расчет устойчивости склона

**Введение.** Характерной особенностью кавказских берегов Черного моря является наличие большого количества палеосейсмодислокаций, представленных крупными блоковыми оползнями и обвалами [1,2,6-9, 12-14]. Эти образования начали изучать с середины прошлого века, но их природа до настоящего времени является предметом дискуссий.

Впервые на обвально-оползневые накопления на побережье п-ова Абрау, сложенные грубообломочным материалом (глыбами, крупными блоками) пород мелпалеогенового флиша, обратил внимание В. Л. Болдырев [2]. Он установил, что оползни-обвалы приурочены к крыльям антиклинальных складок, падающих в сторону моря и прослеживаются на морском дне до глубины 50 м. По мнению В.Л. Болдырева оползни-обвалы являются древними (новоэвксинскими) и образовались при значительно более низком, чем в настоящее время, уровне моря в результате тектонических процессов. Позже М. М. Алексеев и Н. А. Ходырев [1], дополнили описание рассматриваемых оползней-обвалов, оценили их мощность и высказали предположение о приуроченности стенок отрыва обвально-оползневых блоков к зоне вдольберегового разлома.

А. Б. Островский первый высказал предположение о том, что оползни-обвалы в полосе побережья Черного моря являются «палеосеймотектоническими дислокациями» и были созданы 9-балльными и более сильными землетрясениями [8]. В. С. Хромовских, В. П. Солоненко, Р. М. Семенов и др. [13] эти дислокации («блочные оползни») отнесли к особому типу сейсмогравитационных структур в области «расщепления» флишевой толщи. Их образование по мнению авторов указанной работы «нельзя объяснить иначе, как сейсмовибрационным эффектом при землетрясениях умеренной интенсивности». С. А. Несмеянов [6] идентифицировал блочные оползни в зоне изученного им Утришского сброса с так называемыми блоками «гравитационно-тектонического отседания», не исключая участие в их образовании и сейсмовибрационного фактора. В последнее время описываемые структуры изучаются специалистами Кубанского государственного университета [9,14].

Согласно полученным ими данным сейсмогравитационные деформации Черноморского побережья Кавказа могли возникнуть в результате серии сейсмических событий с интенсивностью 8-9 баллов по шкале MSK-64. По данным А.А. Никонова [7], наиболее ранние Утришские сейсмодислокации возникли в 9-11 вв. н.э. при 8-9 балльном землетрясении. По мнению Шулякова Д. Ю. [14] тектонико-сейсмогравитационные сместившиеся тела (оползни-обвалы) сейсмогравитационного происхождения на полуострове Абрау значительно древнее и возникли в результате 8-10 балльных землетрясе-

ний в 63 году до н. э. или в 417 году до н. э. Их формирование по мнению указанного автора связано как с сильными землетрясениями прошлого, так и с криповыми подвижками бортов активных разломов.

Один из таких сейсмогенных оползней отрыва-скольжения (согласно классификации гравитационных склоновых процессов, М. Ю. Кропоткина [4]), расположенный на юго-западном склоне хр. Семисом в 0,4 км от устья р. Шингарь, был детально изучен в связи со строительством здесь трубопровода большого диаметра методом микротоннелирования.

**Методы исследований.** С целью изучения строения оползневого тела, его морфологии, установления мощности оползневых накоплений, определения кровли несмещенных (коренных) пород, картирования зон тектонических нарушений и зон повышенной трещиноватости, установления гидрогеологических условий склона, состава и свойств слагающих его пород применялся широкий комплекс методов [10,11]. Среди них основными являлись:

- дешифрирование аэро- и космоматериалов;
- маршрутные наблюдения;
- проходка и опробование горных выработок, лабораторные исследования грунтов;
- геофизические исследования: с поверхности земли (электротомография, электропрофилирование, сейсморазведка КМПВ), скважинные методы (электрический гамма, индукционный, акустический каротаж, термометрия, резистивиметрия с засолением, кавернометрия, видеокаротаж в сухих интервалах скважин).

Морские геофизические исследования включали непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), многолучевое эхолотирование (МЛЭ) и гидролокацию бокового обзора (ГЛБО).

**Характеристика сейсмогенных оползней района исследований.** Маршрутные наблюдения, дешифрирование космоматериалов, фоновые материалы (ООО «Геопроектстрой») свидетельствуют, что побережье полуострова Абрау характеризуется наибольшей плотностью оползней в сравнении с другими береговыми участками Черного моря. Дешифрирование крупномасштабных космических снимков показало, что наиболее крупные оползневые тела развиты в северо-западной части района работ и приурочены к зоне Утришского (Западноутришского) разлома. Утришский разлом выделен А.Б. Островским [8] и по его данным прослеживается в виде крутого уступа в прибрежной полосе Черного моря от устья р. Сукко до мыса Утриш, где он представлен стенками отрыва оползней и рвами расседания.

По результатам проведенного ООО «Геопроектстрой» исследования, все нарушения в районе работ разделяются на сеймотектонические (рвы и уступы) и сейсмогравитационные (оползни, обвалы и каменные лавины). При этом отчетливо выделяется две генерации сейсмогенных образований.

Наиболее крупные нарушения рельефа береговой зоны зафиксированы в районе мыса Бол. Утриш. Здесь крупный блок флиша достигающий в поперечнике 400-500 м, оторвался от Навагирского хребта и сместился в сторону моря. Характерной чертой Утришской структуры является непропорционально большая по отношению к величине вертикального смещения, ширина рва (90-130) м. Общая длина нарушения (не считая подводной части) – около 1,3 км.

Полевые морские работы выполнялись в районе Утришских оползней ГНЦ ФГУГП «Южморгеология» в 2005-2006 гг. Установлены, что оползневые тела прослеживаются до глубин моря 40-50 м, образуя высокие (до 25-30 м) банки с крутыми склонами (до 45°). Отмечалось, что на одном из изученных оползней оползневой язык до полутора раз длиннее берегового склона. В этой связи сделано предположение о неоднократном сползании пачек флиша с подталкиванием оползневых масс, сошедших ранее.

К северу от мыса Бол. Утриш оползни прослеживаются вплоть до пос. Су-Псех. В частности, небольшим скальным оползнем поражен восточный склон горы Солдатская (пос. Сукко). В тыловой части оползневого блока, сложенного ненарушенными мергелями и известняками, образовался ров глубиной около 2,5 м при ширине до 6 м. Величина горизонтального перемещения составляет около 140 м, вертикального – 8-10 м. В 10 км на СЗ от этого оползня наблюдается еще один крупный скальный оползень размером до 445 м в поперечнике. В плане он имеет циркообразную форму. Высота стенки отрыва около 10 м. Участок развития оползней, как древних, так и современных прослеживается и в окрестностях пос. Су-Псех. Здесь нами обнаружен древний оползневой цирк дугообразной формы. Его протяженность около 1,5 км. Тело оползня практически полностью уничтожено абразией. Величина смещения блока около 30 м.

**Характеристика изученного оползня.** Изученный оползень сформировался на склоне ЮЗ экспозиции, в узле пересечения зон разрывных нарушений разных направлений. Зоны выделены по геоморфологическим признакам (приурочены к балкам на суше и ложбинам в пределах бенча), а также геофизическими методами. Угол наклона склона достигает 50-65°. Оползень имеет в плане циркообразную форму, длина его тела достигает 160 м, ширина около 700 м. Продольный профиль оползня в плане ступенчатый, средний угол наклона поверхности изменяется от 30° до 45°. Высота стенки отрыва изменяется от 3-4 до 12 - 15 м. Мощность оползня по данным геофизических исследований (ЭТ, видеокаротаж скважин), кавернометрии бурения изменяется от 20 м до 60 м, уменьшаясь вниз по склону. Язык оползня срезан активным клифом, высота которого достигает 20 м.

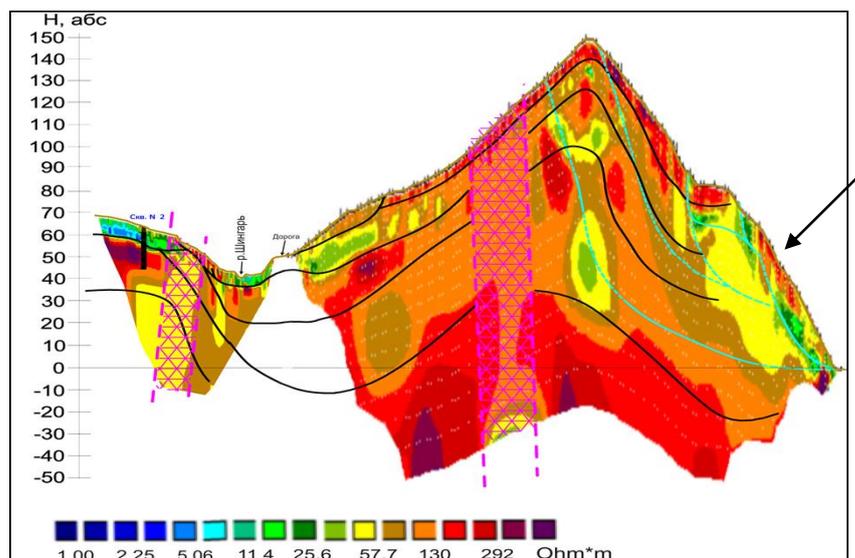
В стенке отрыва оползня обнажаются мергели и песчаники, залегающие моноклинально и довольно круто падающие в сторону моря. Песчаник серовато-коричневого цвета, прочный, плитчатый. Прослой песчаника фрагментарно перекрыт мергелями серыми сильновыветрелыми, сильно трещиноватыми, малопрочными. Падение пластов – юг-юго-запад (параллельно склону) 56°.

Делясивные образования представлены преимущественно мергелями известковыми от очень низкой прочности до средней прочности, переслаивающиеся с известняками глинистыми и алевроитовыми от малопрочных до прочных; известковыми песчаниками от средней прочности до прочного; известковыми алевролитами средней прочности и алевроитовыми известняками, от средней прочности до прочных. При подготовке образцов для лабораторных испытаний на физические и физико-механические свойства, обладающих от пониженной до очень низкой прочности, происходило их разрушение, что являлось также следствием повышенной трещиноватости описываемых толщ. Вследствие этого, в основном, были опробованы грунты от малопрочных до прочных.

У ненарушенных коренных пород скорость продольных волн ( $V_p$ ) составила 3000 - 3300 м/с, а поперечных ( $V_s$ ) - 1500-1700 м/с. В зонах повышенной трещиноватости скорости понижаются,  $V_p$  до 2650 м/с,  $V_s$  до 1350 м/с. В оползневых накоплениях, скорости также уменьшаются, но изменяются в большом диапазоне  $V_p = 1200-2400$  м/с,  $V_s = 600-1300$  м/с. Это свидетельствует о сложном строении оползневого тела и наличии в нем ненарушенных блоков пород флиша. Необходимо отметить, что сейсморазведка КМПВ имеет определенные ограничения при работе на участках с инверсионными разрезами.

Сейсмические данные были дополнены электротомографией. Опыт использования этого метода для выявления разрывных нарушений и зон повышенной трещиноватости представлен в нашей работе [5]. На рис. 1 демонстрируется пример применения электротомографии при исследовании рассматриваемого оползневого участка. Как видно, на разрезе достаточно четко прослеживаются границы древнего оползня, благодаря пониженным значениям удельного электрического сопротивления (УЭС) оползневых отложений.

При определении мощности оползневых накоплений хорошо себя зарекомендовали также методы видеокаротажа и кавернометрии. На рис. 2 в интервале глубин 28-30 м одной из скважин прослеживается зона контакта оползневого тела с несмещенными коренными породами. Отчетливо видно, что толща оползневых образований в этом интервале представлена глыбами, скрепленными глинистым материалом, имеются пустоты, размер которых превышает номинальный диаметр скважины в 2-4 раза. Ниже залегают породы коренного основания, стенки скважины «гладкие», без трещин и каверн. Далее по стволу скважины в коренных породах встречаются трещины, заполненные кальцитом.



**Рис. 1.** Геоэлектрический разрез долины р. Шингарь и хр. Семисом. Вертикальные зоны повышенной трещиноватости – «штриховка»; предполагаемые зеркала скольжения оползневых тел – «прерывистые линии»; древний оползень – «стрелки»



а



б

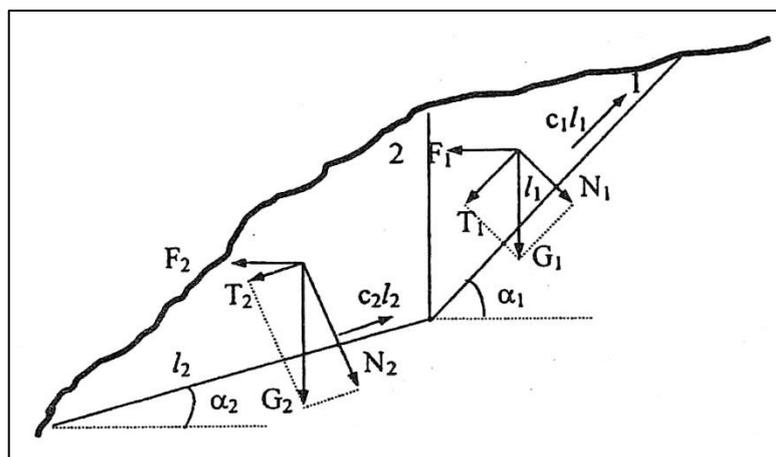
**Рис. 2.** Кадры видеосъемки ствола скважины: а-крупнообломочные оползневые накопления в интервале глубин 28 - 30 м; б- коренные отложения мел-палеогенового флиша.

**Оценка устойчивости склона.** С целью составления прогноза проявления оползневых процессов на рассматриваемом участке, вдоль оси проектируемого трубопровода были выполнены расчёты устойчивости склона. Расчёты устойчивости склонов, сложенных породами флиша (известняки, песчаники, алевролиты) и оползневыми накоплениями, выполнялись по методу Н.Н. Куваева [3].

В ходе проведения инженерно-геологических изысканий было выявлено несколько возможных поверхностей скольжения оползневых тел. Одна поверхность скольжения была выявлена по данным бурения, ряд возможных поверхностей скольжения был

выявлен в процессе проведения геофизических работ. Так как поверхность скольжения древнего оползня, выявленная по данным бурения, залегает на глубине ~50 м, а самая глубокая потенциальная поверхность скольжения залегает на глубине ~85 м, расчёты были выполнены для обеих поверхностей с целью прогноза возможных подвижек, изученного древнего оползневоего тела и образования нового оползня.

Расчёты скальных оползней, результаты которых приведены ниже, основаны на аппроксимации поверхности скольжения двумя плоскостями. При этом оползневой блок разделён вертикальной плоскостью на два фрагмента, чтобы каждый из фрагментов опирался на одну из двух плоскостей скольжения (рис. 3).



**Рис. 3.** Схема для расчёта устойчивости скального оползня.  $G$  – вес фрагмента оползневоего тела,  $T$  – сдвигающая сила,  $N$  – нормальная сила,  $c$  – сцепление,  $l$  – длина основания фрагмента,  $\alpha$  – угол между поверхностью скольжения и горизонталью,  $F$  – сейсмическая сила. Цифры 1 и 2 указывают на номера фрагментов

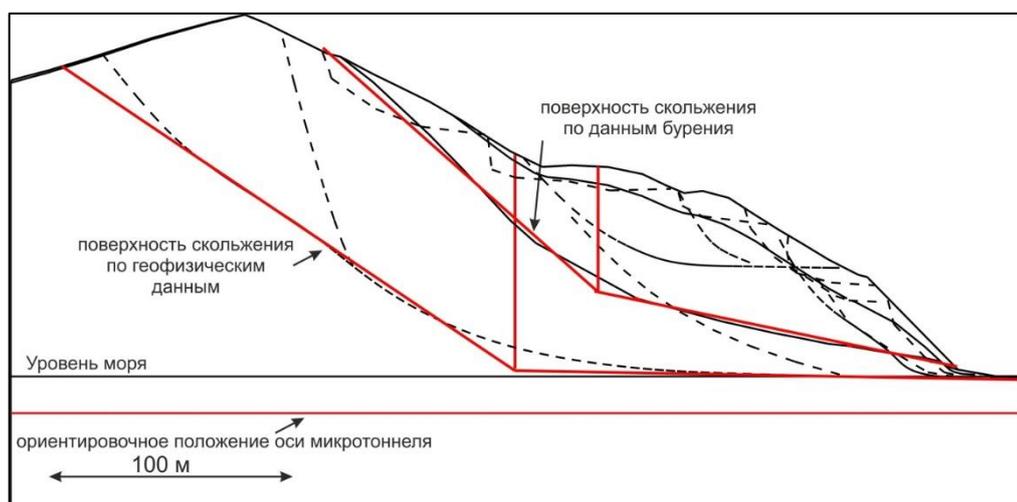
Для расчёта коэффициента устойчивости были использованы следующие соотношения:

$$K_y = \frac{(N_1 \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1 l_1) \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + N_2 \operatorname{tg} \varphi_2 + c_2 l_2}{T_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + T_2},$$

$$\begin{aligned} N_1 &= G_1 (\cos \alpha_1 - K_c \sin \alpha_1), \\ N_2 &= G_2 (\cos \alpha_2 - K_c \sin \alpha_2), \\ T_1 &= G_1 (\sin \alpha_1 + K_c \cos \alpha_1), \\ T_2 &= G_2 (\sin \alpha_2 + K_c \cos \alpha_2). \end{aligned}$$

где  $K_y$  – коэффициент устойчивости,  $K_c$  – коэффициент сейсмичности,  $\varphi$  – угол внутреннего трения, остальные обозначения указаны на рис.3.

Расчётные поверхности скольжения показаны на рис. 4.



**Рис. 4.** Геомеханическая схема, использованная для расчётов устойчивости скальных оползней. Пунктирными линиями показаны поверхности скольжения оползней по геофизическим данным. Соотношение масштабов горизонтального к вертикальному 1:1

Расчёты устойчивости скальных оползней выполнялись для двух условий:

- 1) для естественного состояния склона;
- 2) для естественного состояния склона с учётом сейсмического воздействия силой 8,2 балла по шкале MSK-64.

Выполненные расчёты показали, что при естественном состоянии склона для потенциальной поверхности скольжения, выявленной по геофизическим данным, характерно значение коэффициента устойчивости 4,0, а в расчётах по варианту 2 (с учётом сейсмического воздействия)  $K_u=2,4$ . Полученные значения коэффициентов устойчивости свидетельствуют об устойчивом состоянии массива грунтов, опирающегося на рассматриваемую расчётную поверхность.

Для поверхности скольжения по данным бурения для варианта 1 (при естественном состоянии склона) характерно значение коэффициента устойчивости 6,6, а при учёте сейсмического воздействия 3,7.

Результаты расчёта устойчивости скальных оползней показывают, что их можно отнести к оползням длительной стабилизации (по СП 11-105-9 часть II [11]), так как они находятся в устойчивом положении, как в естественном состоянии, так и при расчётном сейсмическом воздействии.

#### Литература:

1. Алексеев М. М., Ходырев Н. А. Оползневые процессы на морском побережье между Анапой и Новороссийском // Материалы Харьковского отдела Географического общества Украины. Вып. XII. Гидрогеология и инженерная геология. –М.: Недра, 1973, с. 86-88.
2. Болдырев В. Л. Обвальнo-оползневой тип берега // Труды Института Океанологии. Том XXI, 1957, с. 118-132.
3. Калинин Э.В. Инженерно-геологические расчёты и моделирование. –М.: Изд-во Московского ун-та, 2006. -246 с.
4. Кропоткин М.П. Гравитационные склоновые процессы - возможная общая классификация // Инженерная геология, 2017, №4, с. 28-38.
5. Миронюк С. Г., Науменко Д. А., Винда А. А. Применение методов сейсмо - и электротомографии для обнаружения зон повышенной трещиноватости при строительстве трубопроводов способом наклонно-направленного бурения в горно-складчатой области // Инженерные изыскания, 2012, №9, с. 18-24.

6. Несмеянов С. А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа. – М.: Недра, 1992. -254 с.
7. Никонов А. А. Об исторических землетрясениях и сейсмическом потенциале в районе г. Анапы // Сейсмологический бюллетень Украины за 1993 год. Симферополь, 1996, с. 84-87.
8. Островский А.Б. Палеосеймотектонические дислокации на Черноморском побережье Северо-Западного Кавказа в связи с оценкой современной сейсмической опасности этой территории // Комплексные исследования Черноморской впадины. М.: Наука, 1970, с. 46-58.
9. Попков В.И., Крицкая О.Ю., Остапенко А.А. Сейсмогравитационные деформации и оценка сейсмической опасности южного склона Северо-Западного Кавказа // Актуальные проблемы современной сейсмологии: сборник докладов Международной конференции, посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 12-14 октября 2016 г. Ташкент, Узбекистан. Ташкент, 2016, с. 452-456.
10. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям на оползневых склонах Северного Кавказа с целью их хозяйственного освоения. – М.: Стройиздат, 1983,-68 с.
11. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. –М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000, с. 14-20.
12. Хромовских В. С., Никонов А. А. По следам сильных землетрясений. – М.: Наука, 1984. -144 с.
13. Хромовских В. С., Солоненко В. П., Семенов Р. М., Жилкин В. М. Палеосейсмология Большого Кавказа. –М.: Наука, 1979. - 188 с.
14. Шуляков Д. Ю. Классификация оползней на территории Северного Кавказа//Геология, география и глобальная энергия, 2011, №2 (41), с. 293-300.

## К ВОПРОСУ О КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЯВЛЕНИЯХ В КАРСТУЮЩИХСЯ ТОЛЩАХ ГОРОДА МОСКВЫ

Кашперюк П.И., Никитина К.В.

(НИУ МГСУ, г. Москва)

**Аннотация:** на конкретном объекте изысканий в г. Москве рассматриваются условия формирования и характер протекания карстово-суффозионного процесса. В качестве дискуссии ставится вопрос о возможности определения в процессе изысканий времени и сроков протекания карстово-суффозионного процесса.

**Ключевые слова:** карст, суффозия, инженерно-геологические изыскания, возраст карстово-суффозионного процесса.

Современные требования и рекомендации по выявлению в процессе инженерно-геологических изысканий подземных проявлений карстово-суффозионных процессов в пределах исследуемой территории, согласно СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», предполагают помимо выявления провалов бурового инструмента, необходимость отражения трещин, полостей, каверн в водорастворимых горных породах, скорости их растворения и особенно наличия в карстующихся породах заполнителя полостей и состава его материала. Другим важным аспектом выявления карстово-суффозионного процесса являются гидрогеологические условия территории, включающие сведения о гидравлическом градиенте, наличии напоров и скорости потоков подземных вод, их агрессивности и температуре.

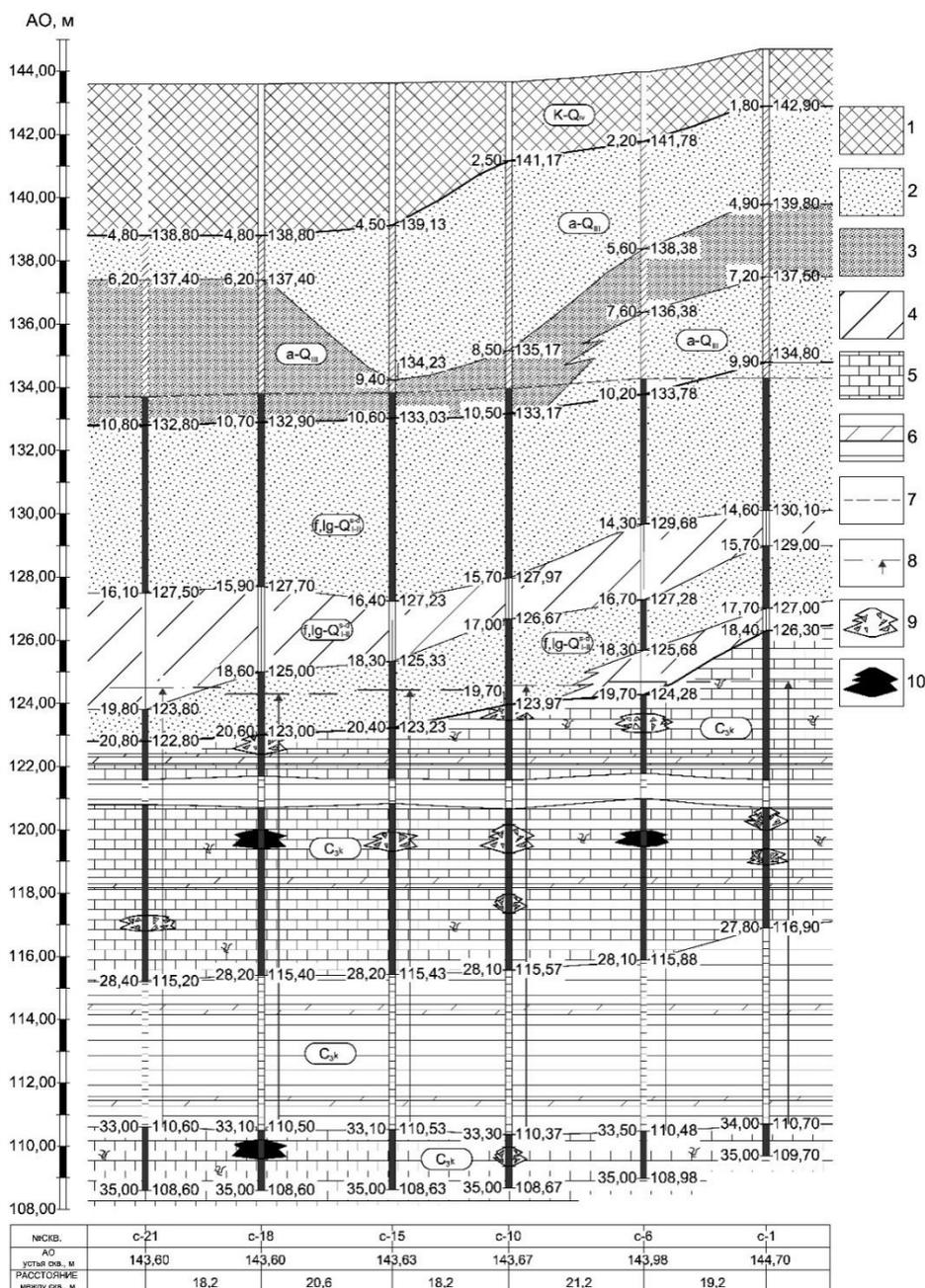
Практика инженерно-геологических изысканий показывает, что в случае обнаружения в карбонатных породах Московского региона разрушенных или сильно трещиноватых зон, а тем более полостей с заполнителем из песков четвертичного облика, доказать безопасность участка в карстово-суффозионном отношении становится крайне затруднительным даже при отсутствии напоров и гидравлических градиентов [1-3].

Согласно утверждениям значительного числа исследователей, присутствие в зонах разрушения карбонатных пород песков четвертичного облика является неопровержимым фактом (основным маркером) протекания здесь карстово-суффозионного процесса [4,5]. Однако, присутствие в полостях карстующихся пород несвязного заполнителя не позволяет определить, когда имел место суффозионный процесс и как долго он протекал. Длительность протекания карстового процесса можно оценить по размерам сформировавшейся полости и определению скорости растворения карбонатной скальной породы при минимальном значении скорости фильтрации воды, не допускающей полного насыщения солевого раствора подземных вод при соответствующей среднегодовой температуре подземных вод (водовмещающих грунтов). Если зона разрушения (полость) достигает в поперечнике 1,0 м, а скорость растворения составляет около 0,05 мм/год, то процесс должен протекать не менее 10000 последних лет.

Известно, что карбоновые отложения в Московском регионе уже более 200 млн. лет находятся в континентальных условиях и, соответственно, насыщаясь подземными водами, могли подвергаться карстовым процессам. Однако, определить геологическое время протекания разрушения карстующихся пород в процессе изысканий не представляется возможным. Чтобы как-то ответить на поставленный вопрос, следует попытаться по существующим в геологии методикам определить абсолютный возраст привнесенных суффозией в карстовые полости песков.

На приведенном инженерно-геологическом разрезе (рис.1) верхнекаменноугольные отложения представлены двумя пачками (перхуровской и ратмировской) известняков мощностью 8,4м и 5,0м соответственно и разделяющей их толщей неверовских

глин мощностью 4,6-6,2м. Как в верхней перхуровской, так и в ратмировской толще встречены четыре и две соответственно выдержанные по простиранию зоны разрушения известняков и доломитов мощностью до 1,4м с отдельными полостями высотой до 0,5м, местами заполненные песками четвертичного облика. Причем, песок присутствует и в нижней ратмировской толще, которая перекрыта пятиметровой толщей плотных неверовских мергелистых глин с тонкими прослоями плотных мергелей, подошва которых находится на отметке 110,5м, т.е. на 12,0м ниже ближайшего уреза воды в реке Москве. Учитывая еще вышележащую толщу перхуровских известняков около 8,0 м, предположить проникновение песчаного грунта сверху невозможно. Следовательно, пески могли попасть в ратмировские известняки только по горизонтали.



**Рис. 1.** Инженерно-геологический разрез участка на Звенигородском шоссе, вл. 11. Условные обозначения: 1-насыпной грунт, 2-песок средней крупности, 3-песок мелкий, 4-суглинок легкий, 5-известняк, 6-глина мергелистая, 7-уровень безнапорных вод, 8-пьезометрический уровень напорных вод, 9-зоны разрушенного известняка, 10-карстовые полости.

Единственным механизмом привноса суффозионного песка в рассматриваемую толщу может являться резкое и глубокое (более 15,0 м, т.е. ниже подошвы верхнего водоупора) понижение уровня напорных вод ратмировского водоносного горизонта. Такое понижение уровня второго от поверхности напорного водоносного горизонта могло быть возможно только в период строительства метрополитена в районе станции «Улица 1905 года» или «Деловой центр», т.е. приблизительно 60 или 20 лет назад соответственно.

Сам же карстовый процесс подготовки и формирования зон разрушения и полостей в карстующейся толще мог происходить в различные геологические эпохи при соответствующих гидрогеологических условиях территории.

В заключение отметим, что в процессе инженерно-геологических исследований и оценки геологического риска территорий проектируемого строительства в карстово-суффозионном отношении, необходимо помимо требований действующих нормативных документов по составу и объему изысканий на карстово-суффозионных участках, предусмотреть:

- необходимость отбора при бурении привнесенного в карстовые полости не связного материала четвертичного облика;
- определение абсолютного возраста отобранного суффозионного материала;
- изучение истории строительного освоения окружающих площадку городских территорий для установления возможных сроков серьезных техногенных воздействий на геологическую среду.

### **Литература**

1. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология. -М.: Наука, 1978, -528с.
2. Ломтадзе В.Д. Инженерная геодинамика. -Л. Недра, 1977, -479с.
3. Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Покрытый карст: необходимые условия, причины и признаки подготовки провалообразования//Промышленное и гражданское строительство, 2013, №11, с.6-8
4. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. -М.: ГЕОС, 2003, -216с.
5. Хоменко В.П. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности//Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах// Материалы Международного симпозиума. -М.: МГСУ,2015, с.50-60

## ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ НА ОДНОМ ИЗ КАРСТООПАСНЫХ УЧАСТКОВ МОСКВЫ

Крашенинников В.С.<sup>1</sup>, Кашперюк П.И.<sup>2</sup>

(1 - ООО НПФ «СИВС», г. Москва, 2 - НИУ МГСУ, г. Москва)

**Аннотация.** Опасные геологические процессы играют значительную, а в отдельных случаях, главную роль при проектировании и строительстве зданий и сооружений. Наличие на участке строительства одного или нескольких таких процессов влечет за собой принятие незапланированных изначальным проектом решений, и, в конечном итоге, приводит к увеличению стоимости строительства. В статье рассматривается пример выполнения инженерно-геологических изысканий в сложных инженерно-геологических условиях.

**Ключевые слова:** карст, подтопление, стена в грунте, гидрогеологическое моделирование.

В 2017 году заказчиками была поставлена задача: выполнить инженерно-геологические изыскания для проектирования и строительства жилого многофункционального комплекса, расположенного на Звенигородском шоссе г. Москвы. Согласно заданию, сооружение представляет собой две башни высотой примерно по 75 метров на едином стилобатном основании, которое является многоуровневым паркингом, с заглублением фундаментной плиты на 14,5 м от поверхности земли. Известно, что на участке предполагаемого строительства существует риск проявления карстовых и карстово-суффозионных процессов, которые могут негативно повлиять на безопасность проектируемого сооружения.

Учитывая последнее обстоятельство, нами была разработана соответствующая программа инженерно-геологических изысканий, включающая бурение скважин, опытные полевые работы (статическое зондирование, штамповые испытания), геофизические исследования (как площадные наземные, так и скважинные, включая видеоконтроль скважин) и гидрогеологические исследования, включающие опытные кустовые откачки и прогнозное моделирование изменения гидрогеологических условий.

### ***Краткая характеристика инженерно-геологических условий площадки изысканий.***

В геоморфологическом отношении площадка расположена на третьей надпойменной террасе эрозионно-аккумулятивной равнины долинного комплекса р. Москвы, на её левом берегу. Участок, размеры которого примерно 100 x 100 м, характеризуется абсолютными отметками поверхности земли 143,50-144,70 м и общим пологим уклоном в южном направлении, в сторону р. Москвы. Поверхность территории участка изысканий искусственно спланирована, практически полностью заасфальтирована, на ней расположено промышленное здание, подземное сооружение ГО ЧС и отдельно стоящие одноэтажные постройки хозяйственного назначения. На момент проведения работ, на участке и прилегающих к нему территориях, поверхностных проявлений карста и других опасных геологических процессов не зафиксировано.

В верхней части геологического разреза, изученного до глубины 50 м, принимают участие отложения четвертичного и каменноугольного возраста.

Четвертичная система представлена: *современными насыпными грунтами* (К-Q<sub>IV</sub>), состоящими из песков различной крупности, с включениями строительного мусора, мощностью 1,6-5,0 м; *верхнечетвертичными аллювиальными отложениями* (а-Q<sub>III</sub>) третьей надпойменной террасы – песками мелкими и средней крупности, преиму-

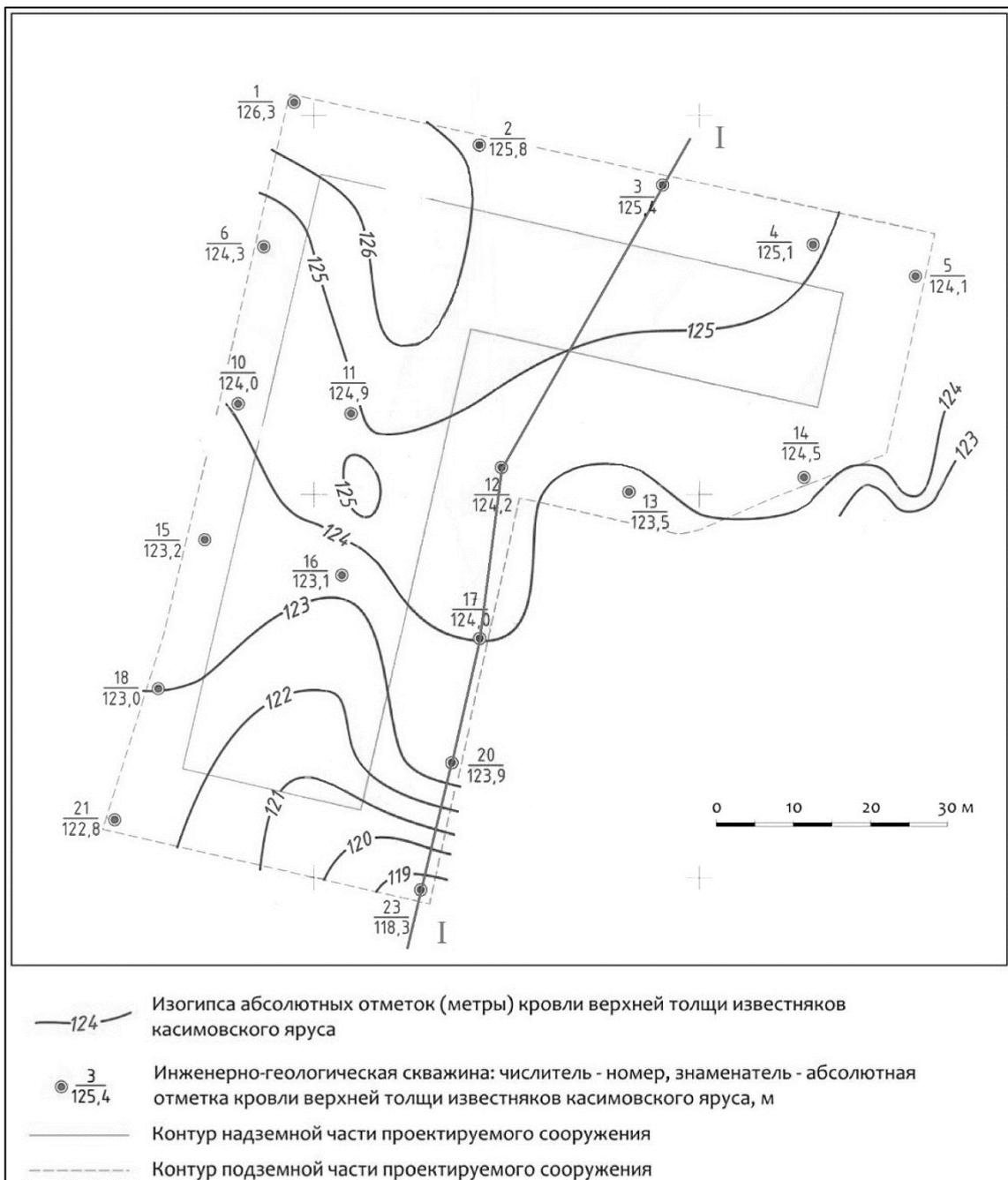
щественно влажными, мощностью 6,2-8,8 м; **нижне-среднечетвертичными водно- и озерно-ледниковыми нерасчлененными** отложениями (f, Ig-Q<sub>I-II</sub><sup>s-d</sup>) сетунско-донского межледниковья–песками мелкими и средней крупности, водонасыщенными, с прослоями суглинков тугопластичных, общей мощностью 8,0-13,6 м. Подошва четвертичных отложений залегает на глубинах 18,4 – 25,2 м.

Ниже, со стратиграфическим несогласием залегают отложения **верхнего отдела каменноугольной системы** (C<sub>3</sub>) – породы **дорогомиловского** (C<sub>3</sub>dr), **хамовнического** (C<sub>3</sub>hm) и **кревьякинского** (C<sub>3</sub>kr) горизонтов. Карбон представлен, в основном, пачками водонасыщенных известняков и доломитов мощностью 4,0 - 6,0 м, переслаивающихся с глинисто-мергелистыми разностями сопоставимой мощности. Необходимо отметить, что известняки являются трещиноватыми, кавернозными, отдельными интервалами (до 0,5 – 1,5 м) разрушенными до состояния щебня и муки. Кроме того, скважинами вскрыты полости высотой до 0,5 м и крупные трещины с раскрытием до 5 см. Встреченные полости как открытые, так и заполненные песчаным материалом четвертичного облика – однородными песками крупными и гравелистыми. Значительная разрушенность и закарстованность отдельных интервалов карбонатной толщи подтверждена, помимо бурения, геофизическими методами (как скважинными видами каротажа, так и площадными исследованиями).

Следует отметить, что на исследуемом, а также на прилегающих к нему участках, отсутствуют мезозойские отложения (Рис. 1), в частности, юрский региональный глинистый водоупор. Связано это с тем, что территория расположена практически на месте древнего русла реки Москвы, т.е. в пределах участка после юрского (доледникового) размыва [1,2,4], вскрывшего карстующиеся каменноугольные отложения. Прослои четвертичных водно- и озерно-ледниковых суглинков не могут являться надежным водоупором, отделяющим толщу четвертичных и каменноугольных отложений, ввиду того, что они не выдержаны по мощности и простираению. Кроме того, в южной части исследуемого участка, в районе скв. №№ 19, 22 и 23, кровля карбона имеет резкое (на 4,0-6,0 м по сравнению с остальной территорией участка) понижение, которое можно идентифицировать как склон эрозионного вреза (Рис.2).



Рис. 1. Фрагмент Государственной Геологической карты Российской Федерации. Дочетвертичные отложения. Серия Московская. Лист N-37-II (Москва) [3].



**Рис. 2.** Карта кровли верхнекаменноугольных отложений.

**Гидрогеологические условия** сложные, характеризуются распространением трех водоносных горизонтов. *Первый* от поверхности горизонт грунтовых вод залегает на глубинах 9,4 - 10,5 м (абсолютные отметки 133,50 – 134,20 м) в нижней части песчаных четвертичных отложений и в верхних слоях каменноугольной толщи – в перхуровских известняках, выше кровли неверовских глин. Мощность водоносного горизонта составляет 15,5-16,8 м.

*Второй* от поверхности касимовский межпластовый напорный водоносный горизонт вскрыт на глубинах 32,0-34,0 м (абсолютные отметки 112,63-110,37 м). Водовмещающими породами являются сильнотрещиноватые известняки и доломиты ратмировской толщи. Мощность водоносного горизонта изменяется от 4,8 м до 5,5 м. Верхним водупором служат пестроцветные глины неверовской толщи, нижним являются воскресенские глины. Пьезометрический уровень зафиксирован на абсолютных отметках 124,11-124,85 м, высота напора составила 12,2 – 14,2 м.

Третий от поверхности нижнекревьякинско-мячковский трещинно-карстовый напорный водоносный горизонт вскрыт на глубинах 43,2-46,7 м (абсолютные отметки 97,4-97,9 м). Водовмещающими грунтами вскрытой части водоносного горизонта являются трещиноватые известняки и доломиты суворовской подсвиты, залегающие в нижней части верхнего отдела каменноугольной системы. Верхним водоупором служат верхнекаменноугольные глины воскресенской подсвиты, нижний водоупор при настоящих изысканиях вскрыт не был. Мощность водоносного горизонта превышает 3,8 м. Высота напора подземных вод данного водоносного горизонта составила 3,6-4,1 м, а пьезометрический уровень зафиксирован на отметке 101,5 м.

На участке, как было сказано выше, существует вероятность формирования поверхностных карстовых деформаций, а учитывая заглубление фундамента порядка 14,5 метров и глубину залегания грунтовых вод – около 10,0 метров, проектируемое здание является подтопленным. Таким образом, на данной территории следует учитывать риск повреждения здания от опасных геологических процессов: карстово-суффозионных и подтопления. Еще одним осложняющим фактором является то, что в непосредственной близости (порядка 20 метров) от проектируемого здания находятся два жилых дома. Информация о подтверждении сложных геологических условий была оперативно передана проектировщикам сразу после бурения первых скважин. Такие инженерно-геологические условия подразумевают применение дорогостоящих и масштабных защитных мероприятий. Необходимо отметить, что проектировщиками изначально был выбран плитный тип фундамента, который, как известно, служит конструктивным защитным мероприятием на карстоопасном участке.

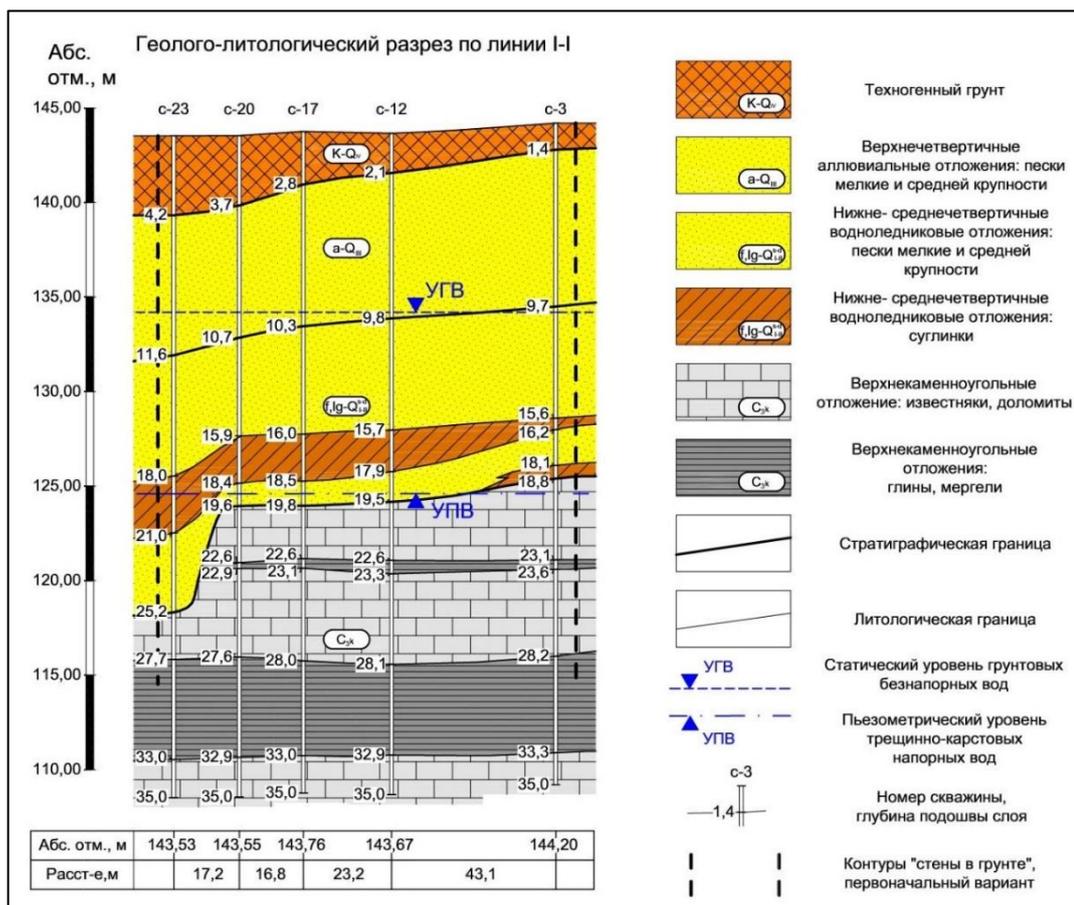


Рис. 3. Схематический геолого-литологический разрез по линии I-I.

Учитывая глубину заложения фундамента, геологические строение и гидрогеологические условия участка, для производства земляных работ и строительства подзем-

ной части комплекса возникает необходимость возведения «стены в грунте» с заглублением не менее чем на 28,0 метров от поверхности земли (Рис.3). Кроме того, внутри ее контура необходимо осуществление водопонижения в первом от поверхности водоносном горизонте не менее чем на 6,0 метров.

Необходимым противокарстовым мероприятием в подобных инженерно-геологических условиях является закрепление верхней (1,5-2,0 метра) толщи сильно разрушенных карбонатных пород путем инъецирования в неё цементирующего раствора. Указанный комплекс дополнительных мероприятий позволяет безопасно выполнить строительство проектируемого здания и гарантирует его дальнейшую безаварийную эксплуатацию. Однако, все это приводит к резкому удорожанию проекта.

К окончанию проведения полевых работ перед заказчиком возник вопрос о дальнейшем развитии проекта. Рассматривалось два варианта решения сложившейся ситуации. Первый вариант предполагал замораживание проекта ввиду возникших технических сложностей для строительства и значительно возросшей его стоимости. Второй вариант – изменение проекта в сторону его упрощения.

В конечном итоге, было принято решение изменить проект, а именно поднять глубину заложения фундаментной плиты с глубины 14,5 до 10,5-11,0 метров, т.е. почти до уровня свободной поверхности грунтовых вод. Такое решение позволяет сэкономить средства на возведении дорогостоящей «стены в грунте» глубиной 28,0 метров. Тем не менее, из-за близкого расположения жилых домов, обустройство котлована в естественных откосах не представляется возможным, поэтому было запроектировано шпунтовое ограждение котлована из стальных труб длиной по 17,0-18,0 метров с забиркой из деревянных досок. Во избежание затопления дна котлована грунтовыми водами, предусмотрено строительное водопонижение.

По уточненному проекту была выполнен прогноз развития карстово-суффозионных процессов и подтопления участка вследствие «барражного» эффекта от шпунтового ограждения.

*Карстово-суффозионные процессы.* На территории Москвы развит карбонатный карст покрытого типа. Согласно «Руководству по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста» [5], выделяется три генетических типа провалов: карстово-обвальный, карстово-суффозионный и смешанный (карстово-суффозионно-обвальный). Анализ инженерно-геологического строения и гидрогеологических условий исследуемого участка показал, что наиболее вероятным здесь является смешанный (карстово-суффозионно-обвальный) механизм формирования провала.

Для реализации этого вида провалов необходимо наличие открытой полости или системы трещин вблизи кровли карстующихся пород, при этом карстующиеся породы должны контактировать с вышележащими дисперсными грунтами. Спровоцировать провалообразование могут следующие факторы:

- расширение трещины или полости, вызванное растворением ее стенок;
- значительные колебания уровня подземных вод первого водоносного горизонта;
- динамические или статические нагрузки на грунтовую толщу.

Пункт 6.12, СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» [6], предписывает определить диаметр возможного провала. Следует отметить, что вопреки многолетнему опыту специалистов-карстоведов и «Техническому регламенту о безопасности зданий и сооружений» (№ 384-ФЗ) [7], который гласит о необходимости оценки риска (вероятности) поражения территории каким-либо опасным геологическим процессом, применение вероятностных методов данным документом не допускается.

Расчет диаметра провала был проведен по геомеханической модели и с использованием формул, изложенных в монографии Хоменко В.П. [8]. Анализ геологического строения, в том числе рельефа погребенных слоев, а также анализ данных зондирования [3] показал, что наихудшие условия с точки зрения вероятности формирования и размера провала, наблюдаются в южной части участка, в районе скважины № 23. Рас-

четный диаметр провала под подошвой фундаментов здания, в районе скважины № 23 составил 10,1 м.

*Подтопление.* С целью прогноза изменения гидрогеологических условий, вызванных строительством проектируемого здания было выполнено гидрогеологическое моделирование. В основе расчетной модели были использованы параметры первого от поверхности водоносного горизонта и вмещающих его грунтов, полученные по результатам выполненных при проведении изысканий опытных кустовых откачек. Модель предполагала перекрытие водоносного горизонта шпунтовым ограждением котлована, для которого, в целях имитации максимального подпора, значение водопроницаемости было принято равным «0» (нулю). Расчеты показали, что максимальный подъем уровня грунтовых вод ожидается с северной стороны проектируемого сооружения, а понижение, соответственно с юго-восточной стороны. Величины подъема и понижения грунтовых вод находятся в пределах 0,5 метра, что сопоставимо с амплитудой сезонных колебаний, составляющих 1,0-1,5 метра.

Тем не менее, заказчику даны рекомендации о необходимости поддержания исправности и целостности водонесущих коммуникаций, а также необходимости предусмотреть организацию и регулирование поверхностного стока с выполнением вертикальной планировки, применением гидроизоляции подземных частей зданий и сооружений, а также дренажно-защитные мероприятия.

*Итоги.* Производство инженерно-геологических изысканий для строительства ответственных сооружений в сложных геологических условиях требует от изыскателей самых серьезных проработок фондовых и литературных материалов уже на стадии составления программы работ и заключения договорных документов.

При проведении изысканий в карстоопасных районах не следует пренебрегать геофизическими исследованиями, которые в комплексе с инженерно-геологическими методами позволяют разносторонне оценить параметры грунтового массива, в частности развитие в нем карста.

Качественное математическое моделирование изменения гидрогеологических условий участка, вызванное как строительством, так и эксплуатацией сооружения, требует ответственного подхода к определению характеристик водоносных слоев и невозможно без проведения натурных опытно-фильтрационных работ.

## Литература

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
2. Государственная Геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Московская. Лист N-37-II (Москва). Ред. Дашевский В.В., ВСЕГЕИ, 2001.
3. Крашенинников В.С. Методика оценки карстоопасности в пределах локального участка изысканий. Материалы Международного симпозиума. Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах. Пермь. 26-29 мая 2015 г. 367 с.
4. Москва: геология и город / Гл. ред. В.И. Осипов, О.П. Медведев. – М.: АО «Московские учебники и Картолитография», 1997 г.
5. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста, М., ПНИИИС, 1995.
6. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. М.: 2016.
7. Федеральный закон от 29 декабря 2009г. №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
8. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. –М.: ГЕОС, 2003.

## ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ И БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

Симолян В.В.

(НИУ МГСУ, г. Москва)

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы определения степени оползневой опасности и безопасности зданий и сооружений по данным скоростей движения оползня, полученных по результатам геодезического мониторинга. Для технического диагностирования состояний зданий предлагается определять крены зданий, вычисленные по данным геодезического мониторинга, в зависимости от скорости смещения оползней с добавлением еще одной категории технического состояния – «предаварийного». Тогда для определения степени оползневой опасности нужно вычислить вероятность наступления неблагоприятного события (технического состояния здания) в зависимости от скорости движения оползня и величину возможного ущерба, причиненного зданию, в связи с неблагоприятным событием.

**Ключевые слова:** оползень, риск, безопасность, скорость, прогноз, обследование, техническое состояние, стоимость, ущерб, аппроксимация.

Изучение оползневых процессов всегда было и остаётся чрезвычайно актуальной проблемой в хозяйственной деятельности и, особенно, в области строительного производства. Из-за возможных оползневых подвижек грунта на склонах появляется опасность нарушения устойчивости зданий и сооружений в результате чего они теряют способность к выполнению своих естественных функций. МЧС России ежегодно фиксирует уже случившиеся оползни и прогнозирует возможные проявления оползней на всей территории нашей страны. Не случайно, поэтому, оползневые процессы являются предметом всесторонних теоретических исследований [1,2,5-10].

Важной составной частью алгоритма комплексной оценки оползневых рисков является определение оценки степени оползневой опасности и уровня оползневой безопасности сооружений от возможных проявлений оползневых процессов ( $S_{оп}$ ) [1,11-14]. Рассмотрим данную процедуру (для удобства анализа этого вопроса) в обратном порядке.

Условие оползневой безопасности  $S_{оп}$  сооружений рассчитывается по формуле:

$$S_{оп} = 1 - R_{оп}, \quad (1)$$

где  $R_{оп}$  – степень оползневой опасности ( $r_{оп} \in [0;1]$ ).

Формула (1) показывает, что оценка уровня оползневой безопасности сводится к задаче определения степени оползневой опасности для зданий и сооружений. Эта задача должна решаться исключительно на основании комплексного анализа всех возможных негативных воздействий на эти строительные объекты со стороны оползневых процессов.

Техническое состояние здания или его конструктивных элементов при проведении обследования зданий – состояние, которое определяет, в какой стадии безопасности находится обследуемое здание или сооружение. Основными параметрами для контроля технического состояния здания с точки зрения геодезии являются: пространственная жесткость здания (геометрические параметры), общая и местные деформации (сдвиги и осадки), крены. Именно фактические значения количественных характеристик определяют техническое состояние здания, которое определяется при проведении его комплексного инженерно-технического обследования. Особенно важно проведение обследований и постановка диагноза состояний после разного рода техногенных и природных воздействий (оползни, землетрясения, пожары и т.п.).

Важность ведения обследовательской деятельности и актуальность проводимых в ее рамках работ подтверждается [3] и [4]. Состояние зданий и сооружений предлагается оценивать на основе рассмотрения четырех категорий:

- нормативное техническое состояние;
- работоспособное техническое состояние;
- ограниченно-работоспособное техническое состояние;
- аварийное состояние.

Для решения задач по определению достоверной картины технического состояния здания в целом, предлагается использовать геодезические методы по определению крена зданий, вычисленные по данным геодезического мониторинга, в зависимости от скорости смещения оползней с добавлением еще одной категории технического состояния – «предаварийного». За каждой категорией после ее присвоения должен стоять комплекс конкретных, четких, понятных и реальных, научно обоснованных мероприятий по приведению здания в исправное эксплуатационное состояние. Этот комплекс мероприятий определяет также уровень затрат на их реализацию (затраты средств, времени и сил).

В табл.1 приведены значения кренов для зданий и сооружений для решения задач по определению достоверной картины технического состояния здания в зависимости от скорости смещения оползней.

**Таблица 1**

**Диагностическая матрица для деформаций основания фундаментов зданий в зависимости от скорости**

Сооружения	Скорость, м/год				
	$v = 0$ (нормальное)	$v = 0,06$ (работоспособное)	$v = 1,5$ (ограниченно-работоспособное)	$v = 10$ (предаварийное)	$v = 18$ (аварийное)
	Крен				
Производственные и гражданские одноэтажные и многоэтажные с полным каркасом: - железобетонным; - то же, с устройством железобетонных поясов или монолитных перекрытий, а также здания монолитной конструкции - стальным - то же с устройством железобетонных поясов или монолитных перекрытий.	0	0,0005	0,001	0,0015	0,002
	0	0,00075	0,0015	0,0022	0,003
	0	0,001	0,002	0,003	0,004
	0	0,00125	0,0025	0,0038	0,005
Здания и сооружения, в конструкциях которых не возникают условия от неравномерных осадок	0	0,0015	0,003	0,0045	0,006
Многоэтажные бескаркасные здания с несущими стенами из: - крупных панелей - крупных блоков или кирпичной кладки без ар-	0	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016
	0	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020

мирования - то же, с армированием, в том числе с устройством железобетонных поясов или монолитных перекрытий, а также здания монолитной конструкции	0	0,0006	0,0012	0,0018	0,0024
Жесткие сооружения высотой до 100 м	0	0,001	0,002	0,003	0,004

Риск можно рассчитать по формуле

$$R = P(v) \cdot D, \quad (2)$$

где  $P(v)$  – вероятность наступления неблагоприятного события (технического состояния здания) в зависимости от скорости движения оползня;

$D$  – величина возможного ущерба, причиненного зданию, в связи с неблагоприятным событием.

Как получить значения величин  $P(v)$  и  $D$ ?

По данным скоростей движения оползня и кренов зданий в каждом цикле наблюдений, получаемых по результатам геодезического мониторинга, уточняем категорию технического состояния зданий. Строим график кривой скорости и аппроксимируем ее соответствующим уравнением регрессии, которая с каждым циклом будет уточняться. Экстраполируя на определенный период времени получаем возможные скорости движения оползня и крена зданий и определяем категорию состояния зданий. Тогда

$$P(v) = \frac{v_{\text{тек}}}{v_{\text{прог}}}, \quad (3)$$

где  $v_{\text{тек}}$  – текущая скорость оползня;

$v_{\text{прог}}$  – прогнозная скорость оползня.

В результате проведенного технического обследования здания составляем смету на выполнение защитных мероприятий (усиление фундаментов, противооползневые мероприятия и др.). Зная стоимость здания, можно рассчитать возможный ущерб по формуле

$$D = \frac{D_d(v)}{D_e}, \quad (4)$$

где  $D_d(v)$  - стоимость защитных работ (руб.);

$D_e$  - стоимость сооружения (руб.).

Рассчитав риск по формуле (2), можно по формуле (1) рассчитать безопасность зданий.

Рассмотрим следующий пример. С моделируем возрастание скорости оползня в течении нескольких лет. Результаты скоростей, полученных по данным геодезического мониторинга, показаны в табл. 2.

**Таблица 2**

**Скорость оползня**

$t$ , год	1	2	3	4	5
$v$ , м/год	0,251	0,634	1,337	2,279	3,550

По результатам мониторинга, являющихся исходными для анализа изучаемого процесса на данном склоне, возникает вопрос об их аппроксимации, то есть в отыскании оптимальной функциональной закономерности рядов скоростей.

При методе аналитического подбора функции используем метод наименьших квадратов. Сущность метода наименьших квадратов состоит в отыскании параметров функции, минимизирующих ее отклонение от точек исходного временного ряда ( $\sum \Delta^2 = \min$ ). Такими функциями, которые соответствуют физической сущности рассматриваемого процесса, являются степенная и полиномиальная.

Для каждого из этих видов зависимостей найдем уравнения регрессии и их графики, используя программное обеспечение «Excel 2013».

Степенная аппроксимация и уравнение регрессии выглядит следующим образом (рис. 1):

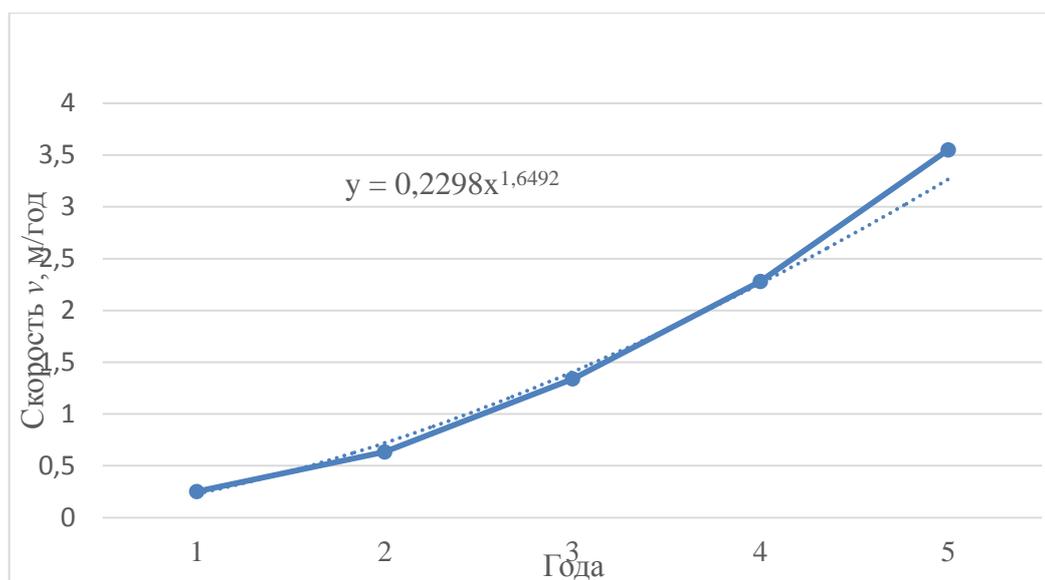


Рис. 1. Степенная аппроксимация

Полиномиальная аппроксимация второй степени и уравнение регрессии выглядит следующим образом (рис. 2):

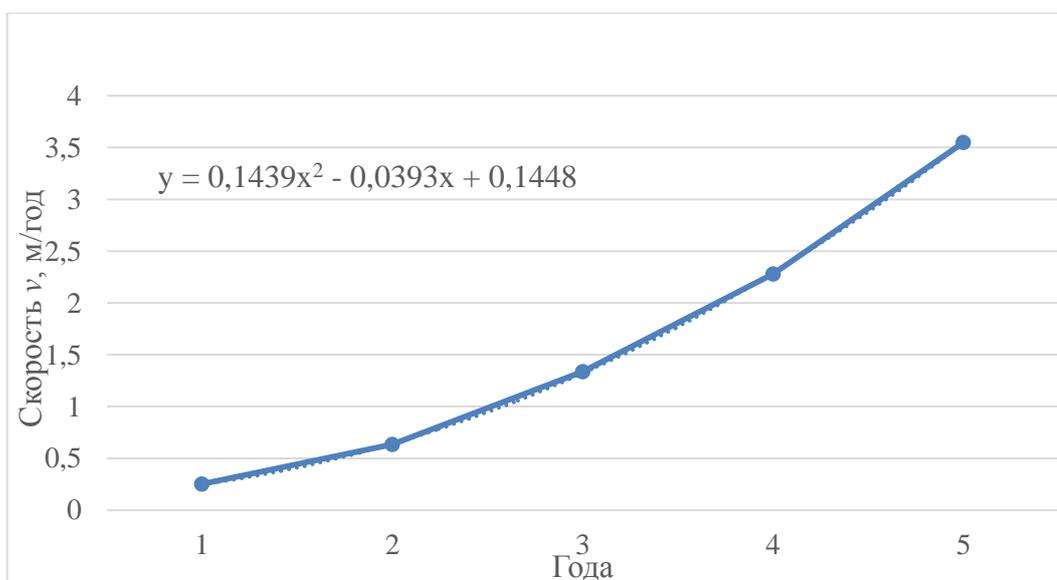


Рис. 2. Полиномиальная аппроксимация

Выполним оценку точности интерполяции этих уравнений. Подставим данные скоростей  $v$  из табл. 2 в полученные уравнения, вычислим разности  $\Delta$  между вычисленным значением  $y_{\text{выч}}$  и исходным, а затем  $\Delta^2$ , которые дают следующие значения (см. табл. 3 и 4):

Таблица 3

## Степенная аппроксимация

$y_{\text{выч}}$	0,230	0,721	1,408	2,261	3,267
$y$	0,251	0,634	1,337	2,279	3,550
$\Delta = y_{\text{выч}} - y$	-0,021	+0,087	+0,071	-0,018	-0,283
$\Delta^2$	0,000441	0,007569	0,005041	0,000324	0,080089

$$\sum \Delta^2 = 0,093464 \text{ м}^2.$$

Среднеквадратическая погрешность (СКП) интерполяции будет:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,093464}{5-1}} = 0,153 \text{ м}.$$

Таблица 4

## Полиномиальная аппроксимация

$y_{\text{выч}}$	0,249	0,642	1,322	2,290	3,546
$y$	0,251	0,634	1,337	2,279	3,550
$\Delta = y_{\text{выч}} - y$	-0,002	+0,008	-0,015	+0,011	-0,004
$\Delta^2$	0,000004	0,000064	0,000225	0,000121	0,000016

$$\sum \Delta^2 = 0,000430 \text{ м}^2.$$

СКП интерполяции будет:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,000430}{5-1}} = 0,010 \text{ м}.$$

Таким образом, получается, что наиболее достоверной является функция, полученная по полиномиальной зависимости.

Выполним экстраполяцию на период через четыре года. Получим возможную скорость движения оползня, равную 11,447 м/год (рис. 3):

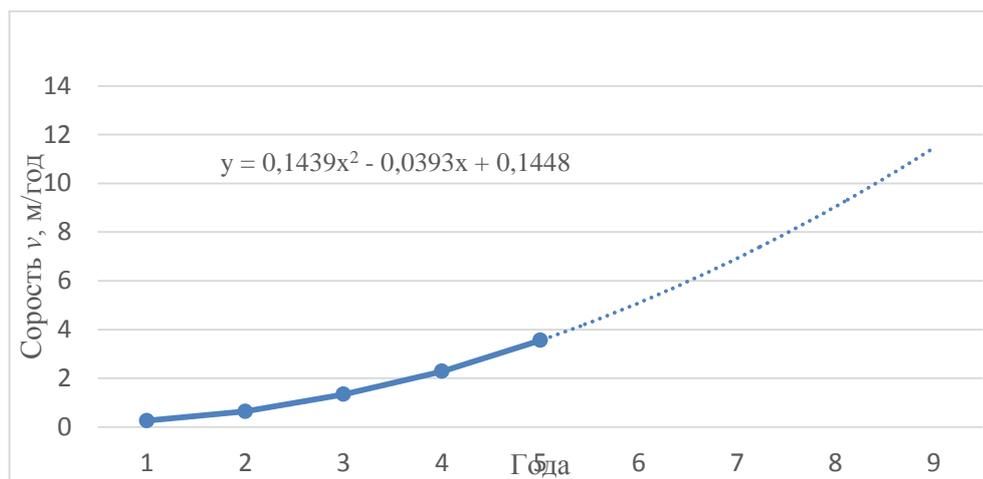


Рис. 3. Экстраполяция полиномиальной аппроксимации

При такой скорости находим крен здания и определяем категорию состояния зданий по табл. 1 – «предаварийное». Тогда

$$P(v) = \frac{3,550}{17,124} = 0,21$$

Вероятный ущерб  $D$ , который может быть причинен зданию, от события равен 0,7. Следовательно,

$$R_{\text{оп}} = 0,21 \cdot 0,7 = 0,15,$$

а безопасность

$$S_{\text{оп}} = 0,85.$$

Если на данном этапе не предпринимать какие-либо меры по защите здания, то через год при скорости  $v = 5,089$  м/год, будем иметь

$$P(v) = \frac{5,089}{17,124} = 0,30$$

$$R_{\text{оп}} = 0,30 \cdot 0,7 = 0,21$$

$$S_{\text{оп}} = 0,79.$$

Таким образом, при увеличении скорости оползневых смещений, риск с каждым годом будет увеличиваться при уменьшении безопасности зданий.

### Литература

1. Безуглова Е.В. Оценка и управление оползневым риском транспортных природно-технических систем черноморского побережья Кавказа. Дис. на соискание ученой степени д.г.-м.н. Краснодар: 2014. – 277 с.
2. Бобрович А.С. Математическое определение запаса устойчивости оползневых объектов. Дис. на соискание ученой степени к.т.н. М.: 2008. – С. 147.
3. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Общие требования [Текст] / Введ. 2011-01-01. - М.: Стандартинформ, 2010. - 66 с.
4. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Текст] / Введ. 2012-04-01. - М.: ГУП МНИИТЭП, 2011. - 89 с.
5. Кузнецов А.И. Разработка метода определения поверхности скольжения оползня по данным геодезического мониторинга. Дис. на соискание ученой степени к.т.н. М.: 2012. – 184 с.
6. Павловская О.Г. Анализ и оценка по геодезическим данным динамики оползней в условиях проведения взрывных работ и разгрузки склонов. Дис. на соискание ученой степени к.т.н. Новосибирск, 2012. – 146 с.
7. Симонян В.В. Обоснование точности и разработка методов математико-статистического анализа геодезических наблюдений за смещениями оползней / В.В. Симонян // Диссертация на соиск. уч. ст. к.т.н. М.: 2008. – 182 с.
8. Симонян В.В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами: монография / В.В. Симонян; 2-е изд. М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. М.: МГСУ, 2015. – 176 с.
9. Фоменко И.К. Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов. Инженерная геология, №6, 2012. С. 44–53.
10. Экзогенные геологические опасности. Тематический том / Под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко. – М.: Издательская фирма «КРУК», 2002. – 348 с.
11. Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S. and Boyce G.M. Slope Stability and Stabilization Methods. New York: John Wiley & Sons, 2002. – 736 p.
12. Australian Geomechanics Society. Practice note guidelines for landslide risk management 2007. Australian Geomechanics. - 2007. - Vol. 42. - No 1. -P. 63-114.
13. HuseinMalkawi A. I. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability / A. I. Malkawi, W. F. Hassan, F. A. Abdulla // Structural Safety. -2000.-№22.-P. 161-187.
14. Practice note guidelines for landslide risk management // Australian Geomechanics Journal. Australian Geomechanics Society (AGS), 2007. - V. 42. -№1. -P. 63-114.

## ОПОЛЗНЕВАЯ АКТИВНОСТЬ ВОСТОЧНОГО УЧАСТКА ВОРОБЬЕВЫХ ГОР В МОСКВЕ И ВОЗНИКАЮЩИЕ УГРОЗЫ

Кропоткин М.П.<sup>1</sup>, Батурин В.И.<sup>2</sup>

(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 ( $C_{2-3}$ ) 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 ( $J_3tt+K_1$ ). 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

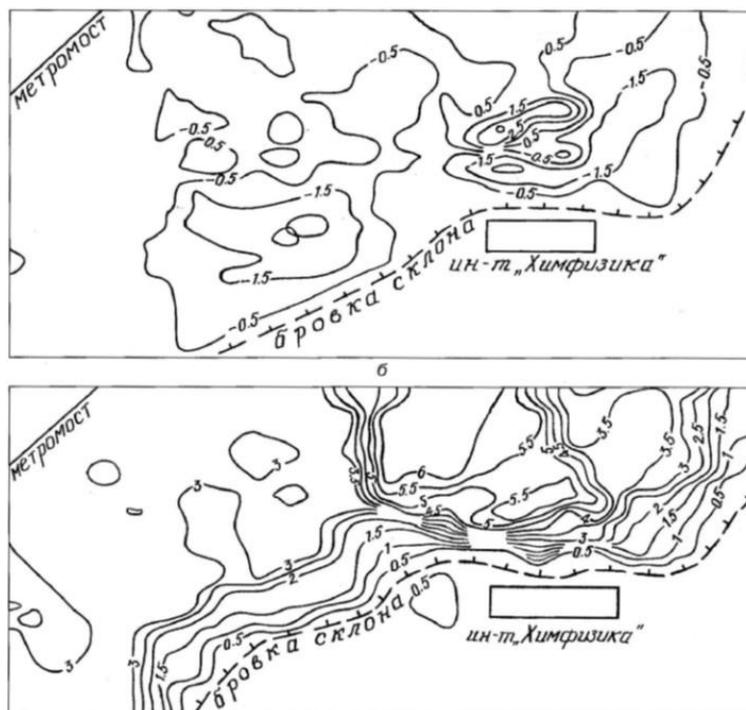


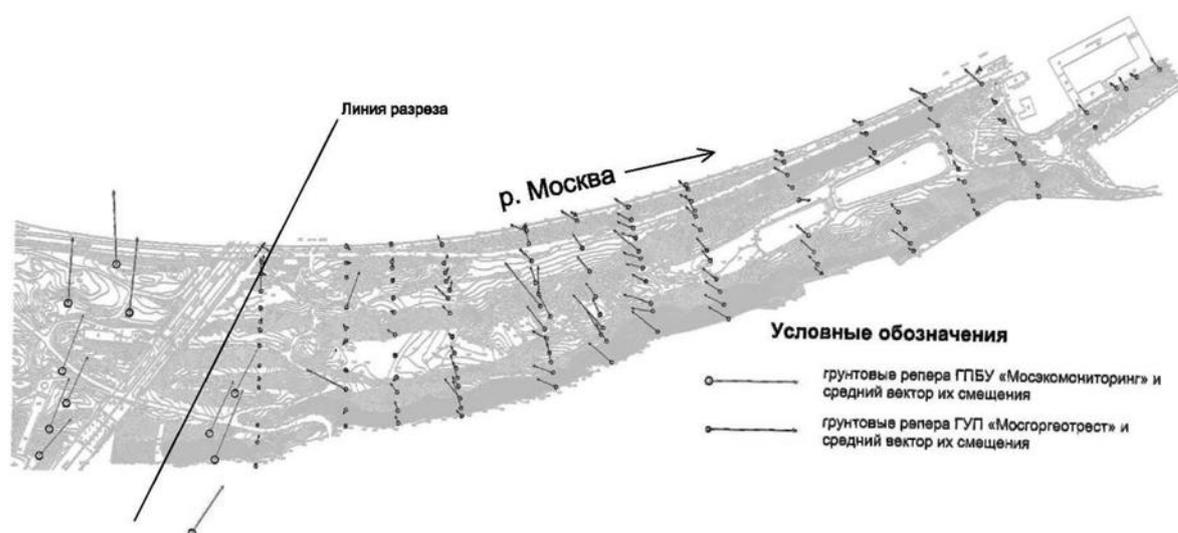
Рис. 2. Среднееголетние скорости высотных (а) и плановых (б) оползневых смещений на Воробьевых горах в период 1974-1995 г., мм/год

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 мостомоста.

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 <sup>2</sup>			Плотность, т/м <sup>3</sup>			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  $\tau$  – сдвигающее напряжение,  $\sigma$  – нагрузка,  $\varphi_w$  – 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).

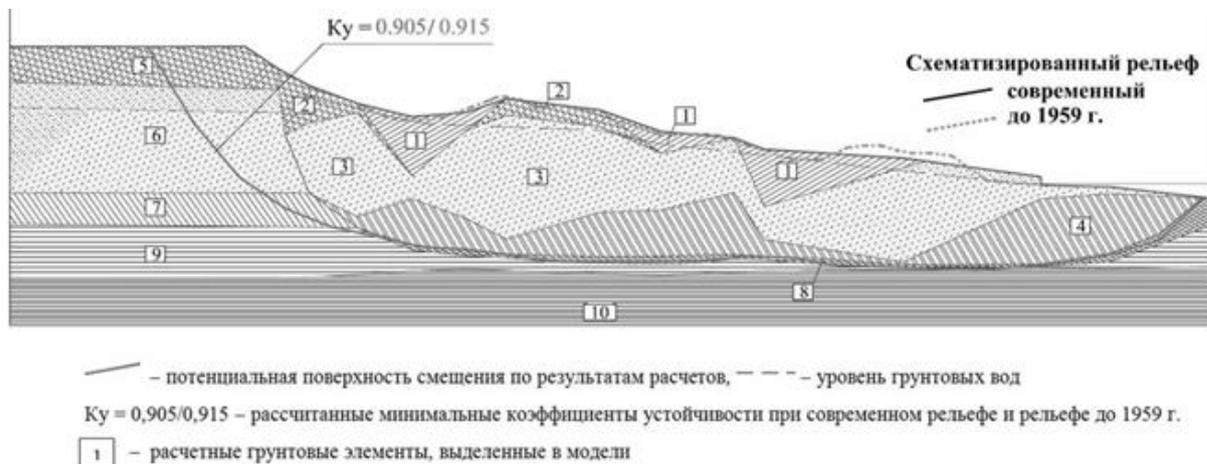


Рис. 4. Результаты расчетов устойчивости

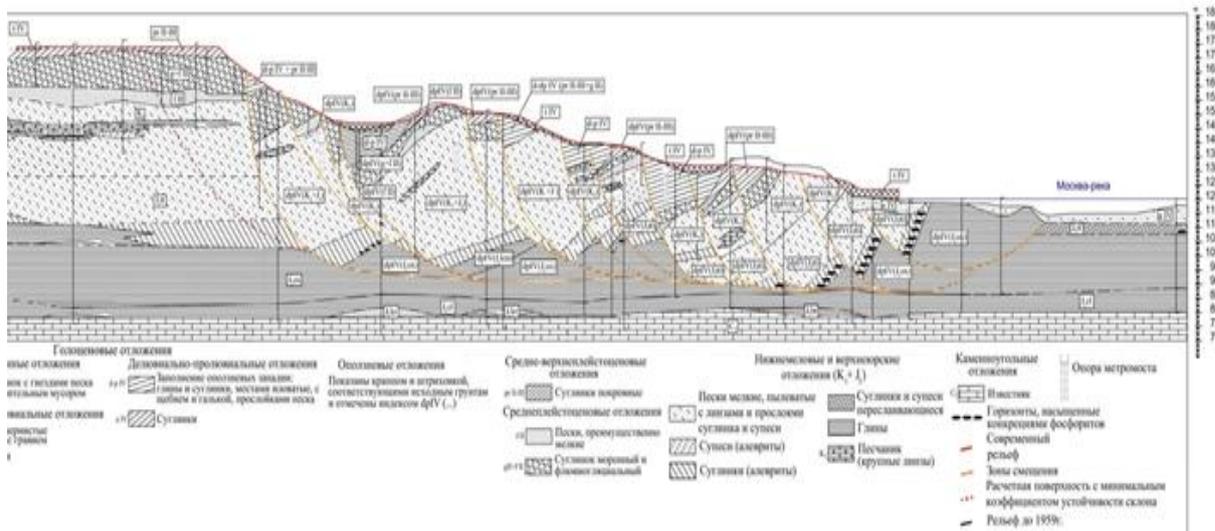


Рис. 5. Разрез восточнее Метромоста

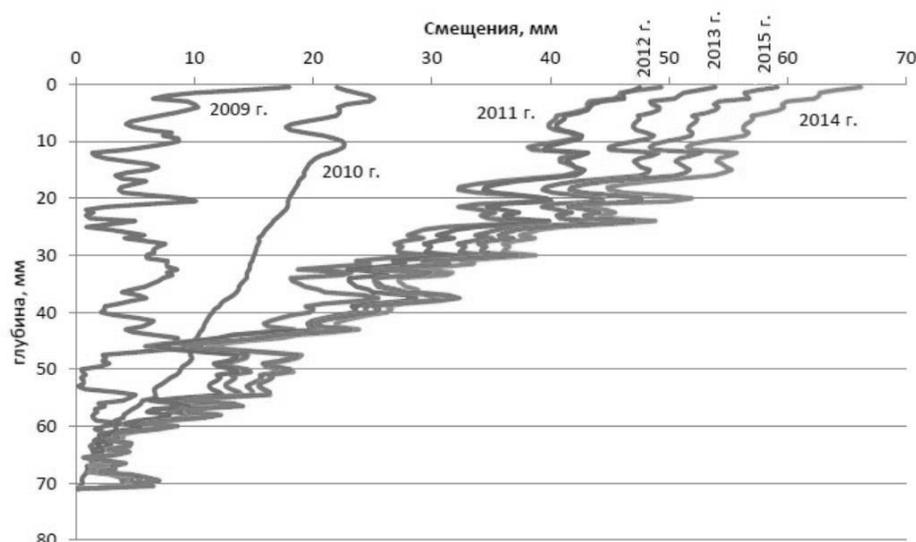
Суммарная величина смещений составляет 105-140 мм за 9 лет наблюдений при точности измерений несколько мм (табл.2). Весьма показательным также практически полное совпадение величин направления горизонтальных смещений у реперов, расположенных на склоне и «плато» (рис. 3). На остальной территории Воробьевых 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.

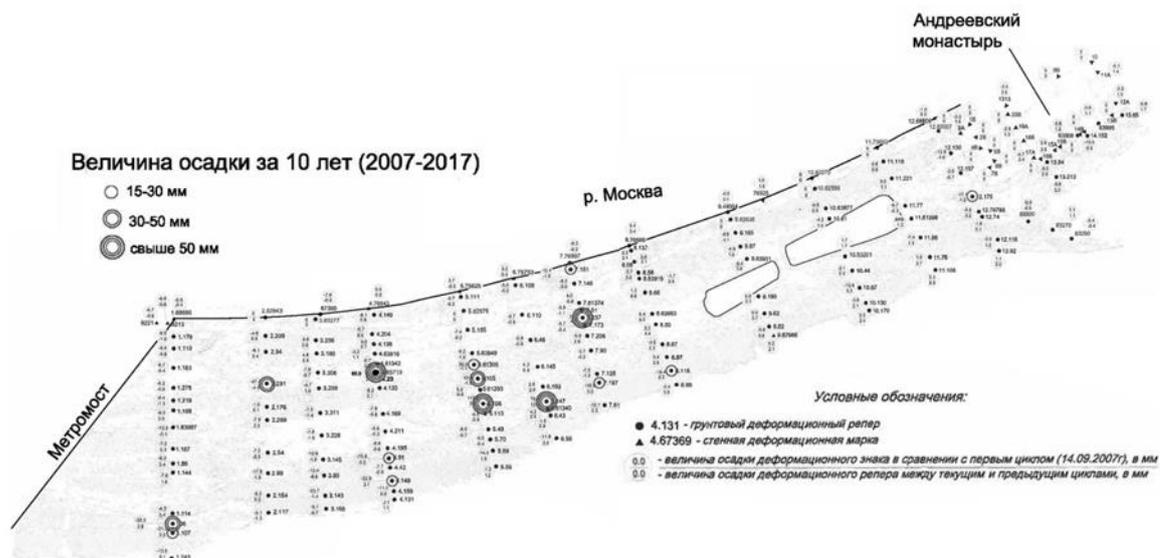
№ реперов	Смещение в плане, мм	Смещение по высоте, мм	Азимут смещения, град
5/4	105,2	-4	29,0
5/3	108,7	-10	25,6
5/2	139,3	-9	23,3
5/1	106,8	-8	35,5

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

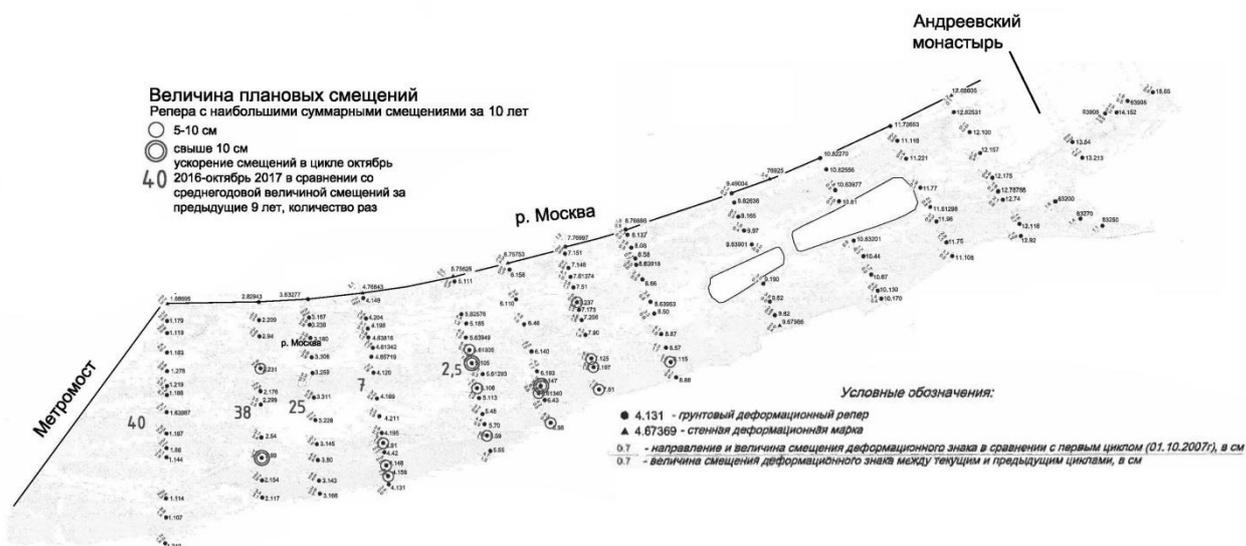
Осадки деформационных знаков (реперов и марок) восточнее Метромоста, исходя из данных ГБУ «Мосгоргеотрест», в целом незначительные и в большинстве случаев находятся в пределах точности измерений. Лишь для 15 реперов, разбросанным по разным частям территории, суммарная осадка за 10 лет превышает 15 мм.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

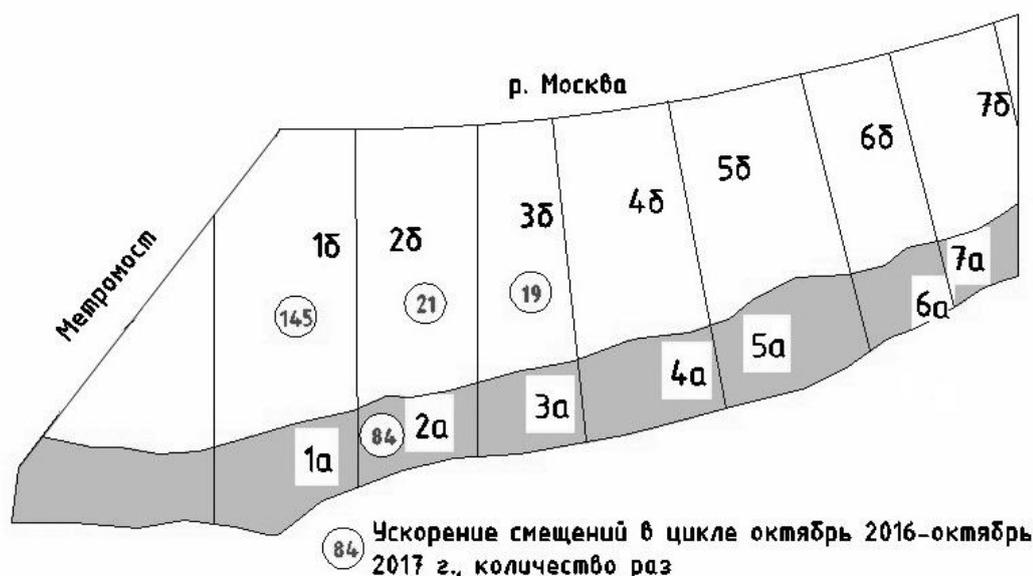


Рис. 9. Схема ускорений смещения, рассчитанных вторым способом

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.

## ТИПИЗАЦИЯ ПОДЗЕМНОЙ ЭРОЗИИ ДЛЯ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ГЕОСИСТЕМЫ «ГРУНТ-СООРУЖЕНИЕ»

Лаврусевич И.А., Хоменко В.П., Абенэ А.И.

(НИУ МГСУ, г. Москва)

**Аннотация:** Опасные экзогенные геологические процессы оказывают негативное воздействие на объекты строительства, а последствия подобных воздействий нередко приобретают катастрофический характер. В статье рассматривается развитие таких процессов как суффозия и подземная эрозия грунтов в рамках единой природно-технической геосистемы «грунт-сооружение». Составленная типизация позволяет идентифицировать тип подземной эрозии и определять рациональный выбор защитных мероприятий. Подробно рассмотрен типичный механизм развития подземной эрозии на примере набережной реки Волга г. Волгограда.

**Ключевые слова:** суффозия, подземная эрозия, типизация подземной эрозии, природно-техническая геосистема «грунт-сооружение», эрозионный канал.

Строительство зданий и сооружений, даже в простых инженерно-геологических условиях, нередко вызывает появление и развитие опасных геологических процессов, таких как суффозия и подземная эрозия грунтов. Последствиями этих негативных процессов являются деформации и разрушения строительных конструкций, а также грунтового массива.

Авторы придерживаются закрепленного в СП 116.13330.2012 определения [1], согласно которому, под суффозией понимается процесс *разрушения и выноса потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и сцементированных обломочных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов*. А под подземной эрозией, понимаются вызванные суффозией разрушения горных пород, в состав которых входит их размывание [2].

Условиями для развития механической суффозии являются, обладающий определенной силой гидродинамический водный подземный поток, структурно-текстурная неоднородность горных пород и наличие области выноса разрушенного механической суффозией грунтового материала. Механическая суффозия принимает вид подземной эрозии при наличии в грунтовых массивах, на контакте с бетонными сооружениями, сквозных подземных каналов, стенки и дно которых размываются свободной гравитационной водой. Зона контакта бетонного сооружения и вмещающего грунтового массива, изначально является потенциально ослабленной зоной для возникновения таких каналов. От состава, свойств, характера и структурных связей горных пород, а также скорости подземного водного потока, зависит их размываемость. Для объектов промышленного и гражданского строительства наибольшую опасность представляет процесс формирования суффозионных полостей, который может протекать в дисперсных грунтах, относящихся к четвертичным отложениям различных генетических типов [3, 4, 5, 6].

Несмотря на то, что суффозионно-эрозионное разрушение грунтов представляет максимальную опасность именно для сооружений и объектов инфраструктуры, до настоящего времени, этот феномен не рассматривался в рамках единой природно-технической геосистемы «грунт-сооружение». До настоящего времени не существует общепризнанной теории процесса подземной эрозии, не определена его самостоятельная роль среди других экзогенных геологических процессов. Отсутствует методика оценки влияния подземной эрозии на устойчивость сооружений и принципы осуществления мониторинга за развитием этого процесса. Составленная типизация подземной

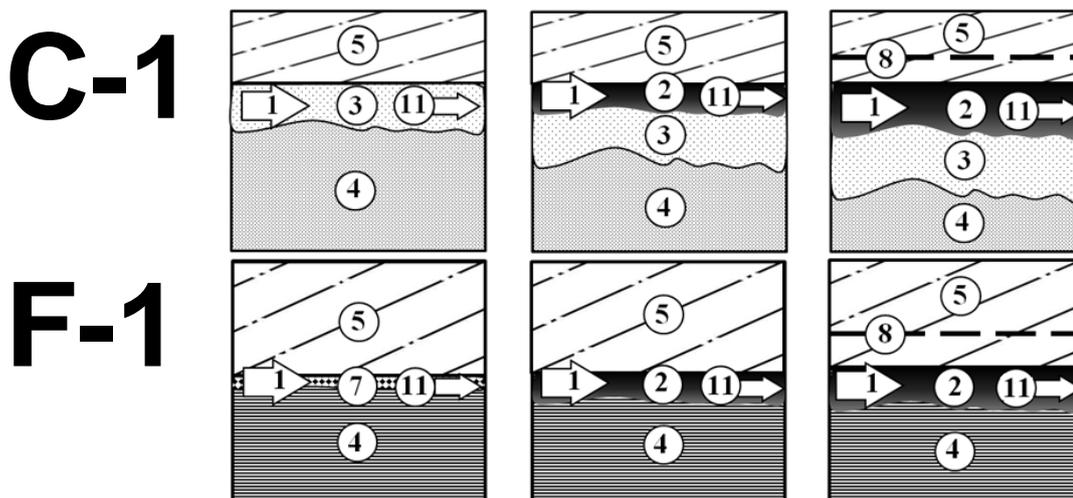
эрозии для природно-технической геосистемы «грунт-сооружение», позволяет идентифицировать тип подземной эрозии и определить рациональный выбор защитных мероприятий.

тип грунтов		дисперсные грунты						п/п	
		несвязные			связные				
расположение эрозионного канала относительно сооружения		све рху	сбо- ку	сни зу	све рху	сбо ку	сни зу	п/п	
направление подземного водного потока	гори- зонтальное	A-1	B-1	C-1	D-1	E-1	F-1		
	наклон- ное	A-2	B-2	C-2	D-2	E-2	F-2		
	вертикальное	нисхо- дящее	A-3	B-3	C-3	D-3	E-3	F-3	
		восхо- дящее	A-4	B-4	C-4	D-4	E-4	F-4	
п/п		A	B	C	D	E	F		

**Рис.1.** Таблица типов подземной эрозии в зоне контакта с бетонным сооружением.

Таблица представляет собой типы подземной эрозии, развивающейся в зоне контакта с бетонными сооружениями в зависимости от пространственного расположения эрозионного процесса (нахождения эрозионного канала) относительно бетонного сооружения (сверху, снизу или сбоку), от направления подземного потока относительно бетонного сооружения (вертикальное, в виде восходящего или нисходящего потока наклонного или горизонтального потока, а также типа грунтового массива (состоящего из связного или несвязного типа грунта слагающего данный массив).

Рассмотрим подробно механизм развития типов подземной эрозии С-1 и F-1 природно-технической геосистемы «грунт-сооружение». В данном случае, эрозионный канал располагается под бетонным сооружением (снизу), а направление водного потока при этом горизонтальное. Тип С-1 рассматривает несвязные грунты, а тип F-1 связные грунты, слагающие массив. В результате суффозионно-эрозионного процесса происходит деформация грунтового массива, зачастую скрытая от визуального наблюдения. Бетонное сооружение подвергается частичной или полной деформации (рис 2).



**Рис.2.** Стадии развития типов подземной эрозии С-1 и F-1 в зоне контакта с бетонным сооружением: 1 – направленный водный поток; 2 – эрозионный канал; 3 – зона суффозионного разуплотнения (неразрушающая фильтрация); 4 – грунт; 5 – железобетонное сооружение; 7 – зона контакта «грунт-сооружение» (канал), 8 – зона потенциальной деформации бетонного сооружения; 11 – направление выноса частиц грунта к зоне разгрузки

Примером, иллюстрирующим вышеуказанные типы подземной эрозии, является набережная Волгоградского речного пассажирского порта. Объект исследования находится на правом берегу р. Волга в самом центре г. Волгограда (набережная Волгоградского речного пассажирского порта, в 300 м. ниже по течению) [7].

В геоморфологическом отношении это южная часть Приволжской возвышенности. Правый берег гипсометрически выше левобережья. Склон облицован армированными монолитными железобетонными плитами размером 2,5х2,5 метра, стыки между которыми залиты бетоном. Основание склона набережной сложено мелкозернистыми песками верхнечетвертичного возраста, угол склона около 30°.

Приблизительно весной 2015 года, произошел провал плиты покрытия, примыкающей к нижнему ростверку, разделяющему укрепленный склон и пойму р. Волги (Рис.3). При осмотре провала плиты и прилегающей территории, выше по откосу, за гребнем ростверка, была обнаружена суффозионная полость размером 1,5х0,8 м. (Рис.4). Измеренная глубина полости более 2,3 м. Видно направление выноса грунта - вниз, под бетонные плиты облицовки склона. В примыкающей к верхнему ростверку площадке не перекрытой асфальтом и плитами по линии разреза видны неглубокие (до 0,4м.) суффозионные провалы диаметром от 0,7 до 1,3 м.

Отсутствие цивилизованного сброса излишков воды при поливе площадки спровоцировали возникновение и развитие суффозионно-эрозионного канала. Увеличение диаметра эрозионного канала и возросшее гидродинамическое давление в нижней части откоса, вызвало вынос песчаного грунта и последующий за ним провал плиты.

Остается опасность провала плит облицовки откоса, так как под ними, на данный момент, уже сформированы суффозионные полости. При детальном осмотре плит облицовки откоса видны небольшие деформации, вызванные выносом и разуплотнением грунта из-под основания плит. Не принятие экстренных мер в кратчайшие сроки, приведет к смещению плит покрытия, последующему разрушению откоса и большим финансовым затратам на восстановление [7].



**Рис.3.** Провал плиты, примыкающей к нижнему ростверку, разграничивающему укрепленный склон и пойму р. Волга



**Рис.4.** Суффозионный провал в верхней части откоса. Направление выноса грунта в сторону провала плиты в нижней части склона.

Составленная типизация подземной эрозии для природно-технической геосистемы «грунт-сооружение» позволяет:

- идентифицировать какой тип подземной эрозии развивается.
- оценивать опасность и последствия воздействия суффозионно-эрозионных процессов на все виды бетонных сооружений и вмещающие их грунтовые массивы.
- разработать комплекс профилактических и оперативных мер для защиты бетонных сооружений и земной поверхности от деформаций.
- создать рекомендации по предотвращению и прогнозированию негативных последствий развития подземной эрозии на эксплуатируемый объект, в зависимости от его конструктивных особенностей и типа грунтов.

### Литература

1. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. М.: Минрегион России, 2012. 60 с.
2. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
3. Лаврусевич А.А., Крашенинников В.С., Лаврусевич И.А. Лёссовый псевдокарст и опыт укрепления лёссовых массивов и откосов искусственными посадками некоторых растений (на примере лёссового плато в провинциях Ганьсу и Шеньси, Китай) // Инженерная геология. 2012. №3. С. 48–58.
4. Лаврусевич А.А., Хоменко В.П. Инженерная защита территорий, пораженных лёссовым псевдокарстом // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 213–220.
5. Лаврусевич А.А., Хоменко В.П., Лаврусевич И.А. Проблемы строительного освоения пораженных псевдокарстом лёссовых массивов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 11. С. 11–13.
6. Лаврусевич А.А., Брюхань Ф.Ф., Лаврусевич И.А., Хоменко В.П. Псевдокарстовые явления в четвертичных и коренных отложениях юго-востока Крымского полуострова // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С. 15–18.

7. Лаврусевич И.А., Лаврусевич А.А. Геоэкологические аспекты развития при-  
клоновой суффозии правого берега реки Волга//Сборник трудов конферен-  
ции Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные про-  
блемы и прикладные задачи Юбилейная конференция, посвященная 25-летию образо-  
вания ИГЭ РАН. 2016. С. 150-153.

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СВЯЗАННЫЕ С ФИЛЬТРАЦИЕЙ В СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ ГИДРОУЗЛОВ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Чернышев С.Н., Зоммер В.Л., Зоммер Т.В.

(НИУ МГСУ, г. Москва)

**Аннотация:** Строительство ГЭС на равнинных реках из-за огромного числа опасных инженерно-геологических и экологических процессов становится все более нежелательным. В противоположность этому скальные основания следует рассматривать как ресурс для возведения высотных плотин. Однако при этом следует учитывать ошибки в фильтрационных расчетах, которые также могут приводить к катастрофическим последствиям.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, скальные основания ГЭС, фильтрационный режим, опасные процессы равнинных ГЭС, опасные процессы в скальных основаниях

Строительство ГЭС на равнинных реках вызывает множество нареканий из-за огромного числа опасных геологических и экологических процессов, сопровождающих весь цикл жизни от строительства и затопления огромных территорий до аварий или эксплуатации морально и физически устаревших систем. Гидроэнергетическому использованию этих оснований препятствует заселенность берегов рек, наличие транспортных сооружений и сельскохозяйственных и лесных угодий.

Строительство плотин на равнинных реках само по себе предполагает затопление несоразмерно больших территорий под водохранилища – с уходом под воду целых населенных пунктов, уникальных зданий и сооружений, культурно-исторических памятников, лесных, сельскохозяйственных и пастбищных угодий. То есть, по сути, оборачивается экологическим бедствием с моральным, материальным и культурно-историческим ущербом. Кроме того, строительство ГЭС на равнинных реках предполагает переселение большого количества коренного населения с исконно обжитых мест.

Плотина, перегораживая равнинную реку, становится препятствием на путях миграции проходных и полупроходных рыб, которые стремятся на нерест в верховья рек. Меняется режим течения реки, снижается проточность, повышается заиление дна, что незамедлительно сказывается на жизни речной флоры и фауны.

В связи с этим в районах равнинных водохранилищ в целом ухудшается экологическая обстановка, включая климат и режим реки в нижнем бьефе. В последнем отношении показателен негативный опыт Красноярского гидроузла. Сброс теплой воды из водохранилища в реку, пересекающую город, приводит к зимним туманам, обледенению мостов, линий электропередач, повышению заболеваемости. Значительные попуски из водохранилища, связанные с пиковым электропотреблением, вызывают зимние паводки в районе ниже города и ледоходы с зажорами на расстоянии нескольких десятков километров от гидроузла, где расположены населенные пункты, которым угрожает затопление при отрицательных температурах.

К сожалению, этот список отрицательных последствий строительства ГЭС на равнинных реках со временем только возрастает. Местное повышение уровня воды постепенно приводит к заболачиванию. На берегах происходит развитие опасных инженерно-геологических процессов – подтопление прилегающих территорий, эрозия и переработка берегов, оползни, развитие карста, заболачивание.

Поэтому дисперсные грунтовые основания, распространенные на равнинных реках, не следует рассматривать как ресурс для строительства гидроузлов энергетического использования, но лишь транспортного использования с небольшими напорами.

В противоположность строительству плотин на равнинных реках, горные территории, как правило, не способствуют компактному заселению и развитию сельского хозяйства. В этой связи емкость будущего водохранилища можно рассматривать как ресурс для аккумуляции энергии, гидроэнергии. А скальные основания в связи с перечисленными качествами – как ресурс для возведения высотных плотин.

Понимание скальных оснований как стратегического ресурса было в Советском Союзе и сейчас имеет место в европейских странах. В СССР на скальных основаниях были построены ДнепроГЭС, Братская, Усть-Илимская, Нурекская, Красноярская, Саяно-Шушенская, Ингури и Черкейская и другие ГЭС. В Италии высокогорные ГЭС построены в Альпах и даже зоне вечномёрзлых грунтов, где затоплению водохранилищами подвержены безлюдные территории без сельскохозяйственного и транспортного использования.

Первое преимущество плотин на скальных основаниях заключается в рациональности строительства в виду высокой несущей способности скалы, которая открывает возможность возводить высотные плотины обжатого профиля, сокращая сроки строительства и стоимость за счет экономии строительных материалов. Второе крупное преимущество состоит в том, что в скальных грунтах долина реки, как правило, заужена в сравнении с другими участками, поэтому плотина получается короче. Третье преимущество заключается в том, что в районе распространения скальных грунтов рельеф земной поверхности не способствует развитию промышленного и гражданского строительства.

Однако строительство высотных плотин на скальных основаниях пока не обходится без опасных, а иногда и катастрофических процессов, при которых гибнут люди, а ущерб во много раз превышает достаточно высокую стоимость строительства гидроузла.

В 1959 году на плотине Мальпасе во Франции произошла одна из самых крупных катастрофических аварий. Катастрофическую ситуацию вызвало то, что арочная бетонная плотина Мальпасе в южной Франции на реке Рейран, предназначенная для ирригации и водоснабжения, была построена всего лишь в 7 км от крупного населенного пункта - города Фрежюс. Поэтому, когда 2 декабря 1959 года плотина рухнула, город практически полностью оказался затоплен. Только по официальным данным при техногенном затоплении погибло 423 человека, а общий ущерб составил около \$68 млн.

Кроме инженерно-геологических просчетов, приводящим к крупным авариям, зачастую оказываются задействованы и другие сопутствующие факторы, приводящие к нарушению технологического режима. Так, работы по возведению плотины Мальпасе были начаты еще в 1952 г., однако ввиду скудного финансирования уже на подготовительных работах частыми были остановки строительства из-за забастовок рабочих, которым вовремя не выплачивали деньги. В целях экономии средств строителям приходилось ухудшать качество бетона; из-за чего в плотине наблюдались течи.

После окончания строительства в 1954-1959 гг. из-за длительной засухи водохранилище плотины Мальпасе было почти не заполнено. Также причиной аварии косвенно послужило и то, что вблизи сооружения военные периодически производили взрывы. К тому же совсем рядом еще происходило строительство автотрассы А8 с применением взрывчатки.

При этом следует отметить, что устройство арочных плотин позволяет простоять им века - почти столько, что и скальные основания, из-за наибольшего сопротивления давлению воды. По нашему мнению, причина аварии кроется в неправильной оценке связи фильтрационной способности с НДС основания: под нагрузкой от плотины тре-

щины в скале закрылись и пьезометрический напор создал непредусмотренное проектом противодействие, которое спровоцировало нерасчетную ситуацию. В результате резкого увеличения гидростатического давления в бьефе примыкание плотины было сдвинуто.

Первые признаки надвигающейся катастрофы были зафиксированы 15 ноября 1959 г., когда была обнаружена повышенная фильтрация воды сквозь правый берег, в 20 метрах от плотины. За этим последовали в течение двух недель обильные дожди, в результате которых выпало 500 мм дождевых осадков, причем в последние сутки перед аварией 130 мм. Уже 27 ноября было отмечено резкое увеличение фильтрации воды сквозь скальный массив правого берега.

В день аварии 2 декабря в связи с тем, что уровень воды в верхнем бьефе (со стороны водохранилища) уже почти доходит до края плотины (находится от него в 28 см) из-за продолжающихся дождей, персонал плотины запросил разрешение на открытие затворов паводкового водосброса. Несмотря на экстренную ситуацию, из-за опасности подтопления стройплощадки дороги А8, находящейся 200 метрах вниз по течению, администрация района не разрешила открыть водосброс. Однако, уже в 18.00 администрация изменила решение и дала добро на частичное открытие затворов водосброса с минимальным расходом – 40 м<sup>3</sup>/сек, которого было явно недостаточно для оперативной сработки водохранилища.

В результате всех перечисленных нарушений, включая неверное административное решение, в 21 час 13 мин. произошло обрушение напорного фронта плотины Мальпасе. Прорыв создал прорывную волну высотой 40 м и скоростью 70 км/ч. За несколько минут были уничтожены две деревни - Мальпасе и Бозон, и та самая стройплощадка автодороги А8, из-за которой не разрешили вовремя начать водосброс.



**Рис. 1.** Вид на плотину Мальпасе после аварии

Наиболее страшная катастрофическая авария произошла в Италии на реке Пьяве в 1963 году на водохранилище Вайонт. Катастрофа была вызвана подтоплением левого борта водохранилища, где залежали трещиноватые известняки юрского возраста. Среди них прослой мергеля и глины, маловлажные в естественных условиях, после увлажнения глины потеряли прочность, структура скади-массива в виде синклинальной складки, по шарниру которой прошла долина, способствовала образованию консеквентного оползня.

Объем оползневой массы составил около 1 км<sup>3</sup>. Скорость схода превысила 100 км/час. Поэтому водохранилище было мгновенно заполнено оползневой массой. Плотина, хорошо рассчитанная итальянскими инженерами на сейсмические воздействия в 8

баллов, устояла при этом ударе, вода водохранилища была выплеснута через плотину в нижний бьеф с подъемом над гребнем плотины на 250 м. масса воды прошла по долине реки через плотно заселенную Ломбардскую низменность, привела к гибели тысяч людей, уничтожению дорог, мостов, садов и виноградников.

Причиной техногенной катастрофы на водохранилище Вайонт является то, что при проектировании не была изучена чаша водохранилища на предмет ее фильтрационной способности, возможности подтопления и прогнозирования процессов в бортах водохранилища.



**Рис. 2.** На фото плотина Вайонт находится в нижнем левом углу, справа — место, откуда сошел оползень

В 1986 году группа профессоров МИСИ С.Б. Ухов, С.А. Юфин и С.Н. Чернышев в Индии консультировали специалистов гидротехников по обеспеченности безопасности плотины Наджарюна. Эта гравитационная высотная плотина по компоновке напоминающая Братский гидроузел, в основании ее лежат кварциты, в которых имеются многочисленные трещины, заполненные алевритом. Ширина трещин до нескольких сантиметров. Обходная фильтрация ведет к суффозионному выносу алевритов из трещин. Многочисленные источники в нижнем бьефе на разных по высоте уровнях с расходом до 2-х – 3-х литров в секунду выносят мутную, желтоватую воду.

Вопросы, поставленные перед экспертами, были следующие: как долго будет продолжаться суффозионный вынос, когда может произойти авария, вызванная деформацией основания и примыканий из-за суффозии. Наша группа экспертов запросила геологические материалы по основанию плотины и примыканиям, данные по наблюдению за деформацией плотины. Оказалось, что разрез по оси плотины отсутствует. Только на следующий день доставили из Дели на самолете схематический разрез без масштаба и каких-либо характеристик грунтов основания. Геодезические наблюдения за деформациями не были организованы.

Это еще один случай, когда отсутствие необходимой геологической информации приводит к непредсказуемым последствиям. Экспертами была предложена программа мониторинга деформаций плотины и ее примыканий.

При наполнении Братского водохранилища на реке Ангаре фильтрация из водохранилища прошла через водораздел Ангары и реки Вихоревка.



**Рис. 3.** Схема головной части Братского водохранилища на реке Ангаре

Фильтрационный поток из водохранилища подтопил правый борт долины реки Вихоревки, где проходит полотно железной дороги, связывающей Братск и Усть-Кут на реке Лене с Транссибирской магистралью. Дорога пострадала, поезда шли со скоростью 5 км в час. Снижение качества дороги до аварийного состояния произошло из-за того, что не были проведены гидрогеологические исследования водораздела между реками Вихоревка и Ангара, не были определены коэффициенты фильтрации скальных массивов на водоразделе, как следствие не был выполнен расчет потерь на фильтрацию и подтопление железной дороги.

Долина реки Вихоревки на аварийном участке следует параллельно долины Ангары на небольшом расстоянии. Гидравлический уклон подземного потока под водоразделом после наполнения водохранилища стал 0,03, что вызвало фильтрационные потери при значительной водопроницаемости залегающих здесь горных пород и подтопление железной дороги проложенной по дну долины.

Приведенные примеры показывают, что актуально определять фильтрационные характеристики скальных массивов в основании напорных сооружений, береговых примыканиях и даже в бортах водохранилищ.

Мы определили в начале статьи, что скальные основания являются ресурсом для получения дешевой гидроэнергии по изложенным выше причинам. Определим, какие характеристики массива нужны для экологически безопасной реализации ресурса.

Необходимо иметь характеристики прочности, деформируемости, суффозионной устойчивости и фильтрационной способности скального массива. Остановимся на последнем. Для определения фильтрационной способности применяется главным образом гидравлическое опробование в скважинах путем откачек и нагнетаний воды. Этот способ дает характеристики в точках опробования, которые как правило различаются для отдельных точек на 5 порядков, менее 0,001 м/сут. до 100 и более м/сут.

Обобщение такого неоднородного массива данных представляет собой сложную задачу, рассмотренную в статьях. Однако в ряде случаев гидравлическое опробование невозможно или технически затруднительно. Это имеет место в примыканиях плотин с широкими раскрытыми трещинами над уровнем подземных вод. Наливы здесь обеспечить невозможно из-за большого поглощения воды и недостаточной мощности насосов, имеющих в распоряжении изыскателей. Между тем определение коэффициента фильтрации в примыканиях весьма актуально – не только с точки зрения проектирования цементационной завесы, но и для обеспечения устойчивости бортов долины и сооружения. Определение коэффициента фильтрации массива совершенно невозможно в условиях вечной мерзлоты. Трещины в многолетнемерзлом грунте заполнены льдом.

В названных условиях определение фильтрационной способности возможно только расчетным методом, который развивали в СССР и за рубежом Ч. Сноу, К. Луи, В. Витке, Е.С. Ромм, С.Н. Чернышев. Этот метод дает неточные результаты, но позволяет оценить коэффициент фильтрации в пределах порядка величины, чего часто достаточно при проектировании напорных сооружений. Метод требует дальнейшего совершенствования с использованием современных возможностей вычислительной техники.

## МОНИТОРИНГ ЗА ОСАДКАМИ ЗДАНИЯ В ЦЕНТРЕ МОСКВЫ ПОСЛЕ ЧАСТИЧНОГО УКРЕПЛЕНИЯ ОСНОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ

Рахматуллина Е.В.

(НИУ МГСУ, г. Москва)

**Аннотация:** в данной статье приведены результаты многолетних (с 2001 г.) высокоточных геодезических наблюдений за осадками жилого здания в центре Москвы. Дом претерпевает неравномерные по времени и по площади деформации, связанные с карстово-суффозионным процессом, протекающим в его основании и направляемым утечками и вибрациями. В целях удешевления работ инъекционное закрепление основания произведено не по всему периметру здания, а локально – усилены торцевые части, которые испытывали наибольшие деформации до ремонта, и не на полную глубину толщи суффозионно-неустойчивых песков. Приводятся результаты анализа эффективности такого укрепления на основании данных осадочных деформаций за 2,5 года. Если до усиления дом представлялся разделенным на блоки, то в настоящее время ПТС здание-основание омоноличена. Скорости развития осадок значительно уменьшились. Работа выполнена под руководством д.г.-м.н., проф. С.Н. Чернышева

**Ключевые слова:** осадка, геодезические наблюдения, карстово-суффозионный процесс, усиление фундаментов, инъекция.

Территория Москвы, в особенности центральная часть города, характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями. Здесь распространены опасные, трудные для прогнозирования карстово-суффозионные процессы. Они прослеживаются на участках, занимающих около 15-20% площади мегаполиса и приуроченных к погребенным долинам реки Москвы и ее некоторых притоков.

Развитие карстово-суффозионных процессов обусловлено наличием в геологическом разрезе значительной по мощности толщи водопроницаемых карбонатных пород каменноугольного возраста, представленные сильнотрещиноватыми кавернозными известняками и доломитами, отсутствием или прерывистым распространением глинистых слоев в кровле карстующихся пород, сверху перекрытые четвертичными аллювиальными, флювиогляциальными и гляциальными песчано-глинистыми отложениями, в которых имеют место суффозионно-неустойчивые разности песков. Активизации процесса способствуют динамические, вибрационные нагрузки (соседнее строительство, постоянно действующие линии метрополитена), интенсивные техногенные воздействия (утечки из водонесущих коммуникаций, откачки подземных вод), вызывающие необратимые изменения в геологической среде города. Отмеченные факторы приводят к негативным последствиям – недопустимым деформациям грунтов в массиве основания, карстово-суффозионным просадкам земной поверхности, и как следствие, повреждению конструкций, коммуникаций или полному разрушению зданий и памятников зодчества столицы.

Согласно действующему постановлению правительства Москвы «Об организации мониторинга геоэкологических процессов в городе Москве», в целях своевременного выявления опасных геологических процессов и предотвращения катастрофических последствий, необходимо осуществлять постоянные наблюдения за геологической средой города. Долговременный геоэкологический мониторинг за неблагоприятными геологическими процессами выявил, что наибольшее практическое значение для прогноза возможных карстово-суффозионных провалов имеют систематические топографо-

геодезические измерения, а также визуальные наблюдения за деформациями зданий и локальными поверхностными оседаниями.

В связи с этим актуально исследование жилого здания в Большом Кисловском переулке. Длительный геодезический мониторинг, регистрация результатов регулярных измерений осадочных деформаций домов в процессе эксплуатации проводятся в течение 18 лет и представляют научный интерес.

Жилой дом 5-7 находится в ЦАО Москвы в среде плотной городской застройки на расстоянии около 300 м от станции метро «Арбатская». Здание представляет собой отдельно стоящее строение, расположенное совместно с корпусом № 2 на общей огороженной территории. Жилищный кооператив – памятник истории. В домах проживал и работал целый ряд выдающихся представителей научной и партийной советской элиты: А.С. Новиков-Прибой, М.С. Маргулис, В.Д. Бонч-Бруевич, Н.А. Семашко, именем которого назывался переулок с 1949 г. по 1994 г. В 50-х годах XX века на фасадах домов всем им установлены мемориальные памятные доски с их барельефными портретами.

Рассматриваемые здания (стр. 1 и 2) построены по проекту архитектора С.А. Влащева в 1928-1930 гг. и имеют «зеркальную» симметрию по отношению к центральной оси огороженного дворового участка. Здания конструктивно однотипны. Они представляют собой двухсекционные 4-х этажные здания с чердаком и подвалом, кирпичными стенами, перекрытиями различного типа и двухскатной крышей по деревянным стропилам. В плане форма корпусов прямоугольная. Габариты зданий: длина – 39,9 м, ширина 12,86 м, высота этажей 3,86 м, высота здания от поверхности земли около 20 м. Конструктивная схема здания перекрестно-стеновая. Фундаменты под наружными и внутренними стенами зданий – ленточные в виде кладки из красного глиняного кирпича на сложном растворе, вскрытые шурфами в 1999 г, находились в удовлетворительном и неудовлетворительном состоянии [1]. В начале 1990-х годов были выполнены работы по увеличению пространственной жесткости строения 1, для этого его наружные стены в уровне чердачного перекрытия по всему периметру здания были стянуты двумя стальными гибкими тязами.

В геоморфологическом отношении здание расположено на древнеаллювиальной третьей надпойменной (Кремлевской или Ходынской) террасе левого берега реки Москвы. Рельеф выровнен в результате многовековой хозяйственной деятельности. Абсолютные отметки рельефа у дома № 5-7 изменяются незначительно от 141,56 до 141,87 м, Общий перепад высотных отметок не превышает 0,3 м.

В геологическом строении основания д. 5-7 стр. 1 до глубины 30,0 м от существующей поверхности земли принимают участие современные техногенные отложения  $tQ_4$ , верхне четвертичные древнеаллювиальные отложения Ходынской террасы реки Москвы  $aQ_3$  и карбонатно-глинистые отложения каменноугольного возраста  $C_3$ .

Современные техногенные образования ( $tQ_4$ ) представлены они песчаными насыпными грунтами, весьма неоднородны по составу, плотности сложения и мощности с включением остатков краснокирпичных фундаментов старых зданий на известковом растворе. Мощность насыпных грунтов изменяется от 4,6 до 5,5 м от существующей поверхности земли и от 1,9 до 3,3 м от пола подвала здания. Рыхлые насыпные грунты неоднородные по составу и плотности залегают непосредственно под фундаментами в отдельных местах у торцевых фасадов здания мощностью до 0,5 м, что не отвечает требованиям действующих норм.

Аллювиальные отложения ( $aQ_3$ ) залегают под техногенными грунтами. По зерновому составу они представлены преимущественно песками мелкими и средней крупности; пылеватые, а также крупные гравелистые пески отмечаются в единичных пробах. Пески по минеральному составу кварцевые желтые и серовато-желтые, по текстуре – рыхлые, средней плотности, реже – плотные. Пески влажные и маловлажные.

Общий анализ массива древнеаллювиальных песков в основании строения 1 по состоянию на 2012 г. [2] показал, что до абсолютной отметки 127,6 м (12,0 м от пола

подвала) этот массив по плотности сложения в целом находится на границе рыхлый / средней плотности. В ряде мест наблюдалось снижение плотности грунтов с глубиной и наличие рыхлых песков на глубине 12 м от пола подвала. В средней части здания массив грунтов основания плотнее, чем в западной и восточной части. Плотные пески встречены локально, в средней части здания на глубине 4,7 - 7,4 м от дневной поверхности, на абсолютных отметках 137,05-134,35 м.

Верхнеюрские отложения ( $J_3ox$ ) оксфордского времени на территории домов, а также Большого Кисловского переуллка отсутствуют. Юрский глинистый водоупор был размыв в дочетвертичное время (с конца мелового периода и до конца днепропетровского оледенения) в процессе формирования палеоврезов.

Комплекс четвертичных аллювиальных отложений на глубине 16-17 м от поверхности земли подстилаются коренными породами верхнего отдела каменноугольной системы ( $C_3$ ), которые представлены отложениями касимовского яруса дорогомилковского горизонта. Они сложены ритмично чередующимися глинисто-мергелистыми и известняково-доломитовыми породами. Поверхность отложений этого горизонта неровная. Кровля каменноугольных отложений имеет наклон порядка  $4^\circ$  в юго-восточном направлении.

В скважине № 37 (северо-западный участок между домами) в 1980 г. уровень воды зафиксирован на абсолютной отметке 131,67 м.

В 2003 г. на поверхности уровня грунтовых вод в юго-восточной части площадки между строениями 1 и 2 отмечаются депрессионные воронки глубиной от 1,0 до 2,0 м, соединенные узким каналом и открытые в сторону Большого Кисловского переуллка. Эти локальные воронки могут быть интерпретированы как свидетельство в пользу возможной нисходящей вертикальной фильтрации.

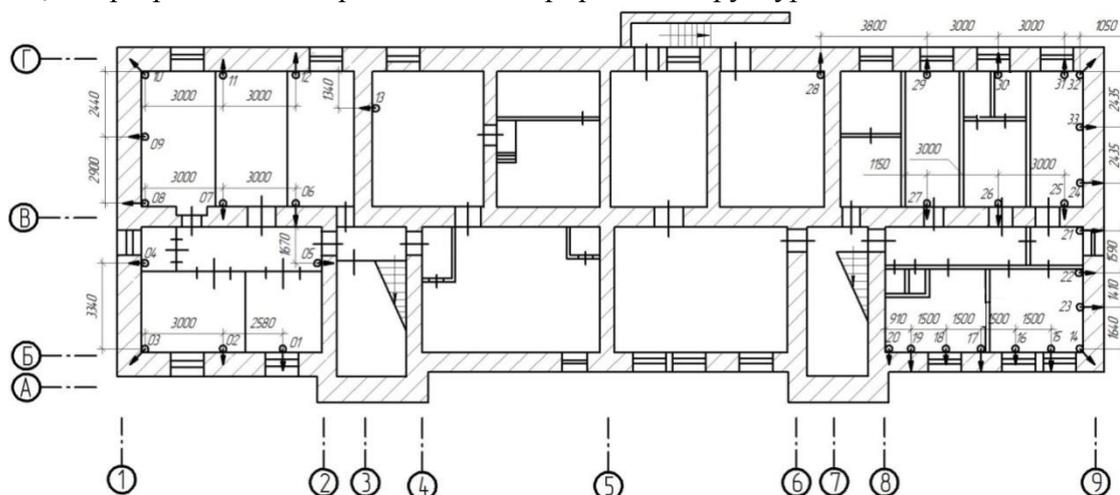
Уровень грунтовых вод в апреле 2012 г. встречен на глубине 15,3 м от поверхности земли, на абсолютной отметке 126,5 м. Падение уровня грунтовых вод за период с 1980 по 2012 г. составило более 5-ти метров, что может быть связано со строительством и эксплуатацией глубоких подземных сооружений, в частности перегонных тоннелей между станциями метро Боровицкая и Чеховская, построенные на известняках каменноугольного возраста в условиях искусственного понижения УГВ путем откачки воды, вследствие которой создалась обширная депрессионная воронка в центре Москвы

Согласно «Карте карстовой и карстово-суффозионной опасности на территории г. Москвы», участок относится к территории весьма опасной в отношении проявления карстовых процессов и к опасной категории карстово-суффозионной опасности. Из всех развитых на площадке карбонатных толщ каменноугольных отложений в наиболее благоприятных условиях для образования карстовых форм находятся известняки измайловской и доломиты перхуровской толщ, которые в результате денудационных процессов были размывы и подверглись интенсивному разрушению. Специалисты ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», выполнявшие в 2003 году сейсморазведочные работы [3], пришли к заключению, что по сейсмическим признакам на площадках строений 1 и 2 дома № 5-7 отсутствуют большие каверны и карстовые полости размерами более 2 м в кровле каменноугольных отложений.

На основании изучения суффозионной устойчивости верхней (10-12 м) пачки песков на площадке, авторы отчета [1] пришли к заключению, что массив древнеаллювиальных песков основания в целом является суффозионно-устойчивым, однако в насыпных не слежавшихся грунтах, в некоторых слоях аллювиальных песков: неоднородных песках средней крупности, встреченных непосредственно под подошвой фундаментов, а также гравелистых неоднородных песках возможны суффозионные явления. Кроме того, на участке наряду с суффозионными процессами возможно также до уплотнение насыпных грунтовых рыхлых разностей аллювиальных песков, имеющих коэффициент  $e \geq 0,70$ . Например, это может произойти под воздействием динамических, вибрацион-



ся на подстилающий скальный массив. Закрепление грунтов производится способом пропиточной инъекции порового пространства грунтов водной суспензией микроцемента, без разрывов и с сохранением его природной структуры.



**Рис.2.** План скважин инъекционного закрепления грунта ГЦС

Проектной задачей усиления являлось обеспечение статической стабильности здания при образовании под ленточным фундаментом суффозионно-карстовой воронки диаметром до 5 м. При рассмотрении поведения конструкции «ленточный фундамент – сваи» на перспективу появления КСВ предполагается полное исключение из работы одной сваи и перераспределение нагрузки на две соседние.



**Рис.3.** Буроинъекционная свая под подошвой фундамента корп. 1 диаметром от 50 см в верхней части до 20 см в нижней. Свая продолжается в нижележащих песках

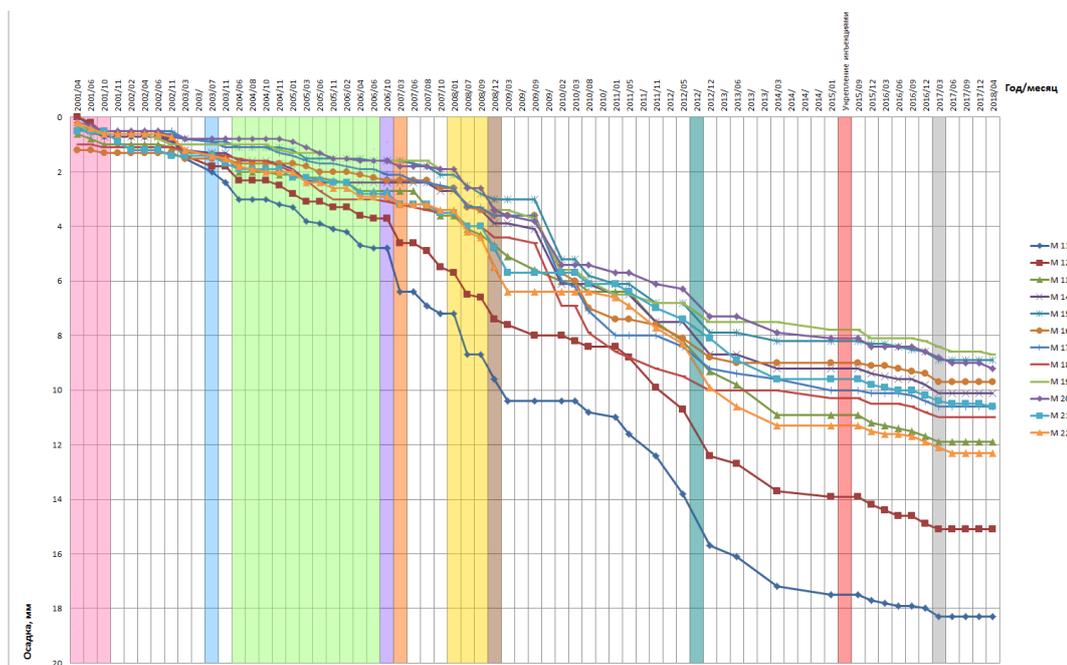
В связи с окончанием работ по усилению кладки фундаментов и устройству буро инъекционных свай для увеличения несущей способности фундаментов было произведено обследование фундаментов и грунтов основания здания [5]. В ходе контроля вскрытием установлено, что бутовая часть фундаментов во всех пройденных шурфах была проинъекцирована цементным и микроцементным растворами с выходом раствора из тела фундамента в полости и грунты обратной засыпки пазух фундаментов. Фактическая прочность сцементированной кладки фундаментов 9,3 МПа, что превосходит

проектную прочность кладки, которая оценивалась 0,7 МПа. Встречены фрагменты инъектирования возможных полостей на контакте фундамент-грунт в виде столбиков песчаного грунта, пропитанного цементным раствором. Выявлено отклонение величины диаметров грунтоцементных свай от проектного, замеры показали значения в диапазоне от 20 до 30 см, частично под подошвой фундамента диаметр составил 50 см.

С марта 2001 года по настоящее время регулярно проводится мониторинг высотных деформаций по 22 осадочным маркам, которые установлены на наружных стенах корпусов 1 и 2. Наблюдения за осадками производятся циклами не реже двух раз в год, как правило, один раз в квартал. Высокоточные инструментальные геодезические измерения осадок оснований фундаментов зданий осуществляются методом геометрического нивелирования короткими лучами по методике I класса.

Развитие осадок деформационных марок во времени по результатам нивелирования за весь период наблюдений с 26 марта 2001 года по 10 апреля 2018 года представлено на рис. 4, 5. Цветом отмечены периоды строительных работ и внешних воздействий вокруг домов 5-7.

По графикам (рис. 4,5) видно, что дома на протяжении многих лет находятся в процессе неравномерных деформаций – стабилизация осадок сменяется последующим их быстрым непрекращающимся ростом и т.д. Такое «блуждание» осадок говорит о непрерывных негативных процессах в грунтах основания, приводящие к их постоянному неоднородному деформированию.



**Рис. 4.** График осадок марок М11-М22 (корп. 1) за весь период наблюдений

Сопоставив графики осадок марок с хронологией строительных работ вокруг зданий 5-7, сделали вывод, что не прослеживается тесная связь неравномерной осадки домов с историей современной застройки соседних владений. На фоне общего погружения фундаментов наблюдается активизация процесса в период утечек из трубопровода теплотрассы в 2008 г. На протяжении стольких лет существующие опускания грунта сломали корродированную трубу. Протечка случилась между углами стр. 1 и 2, которые обращены к Б. Кисловскому переулку и испытывают наибольшие деформации (зона распространения карстово-суффозионной воронки).

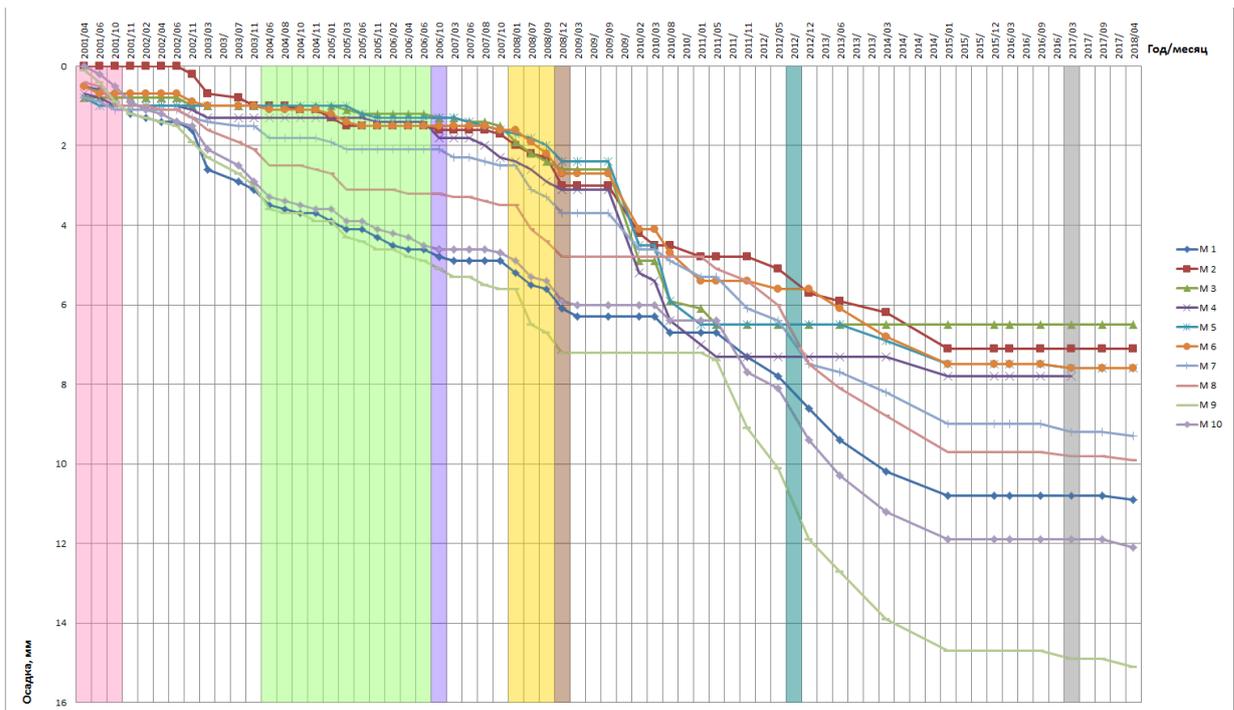


Рис. 5. График осадок марок М1-М10 (корп. 2) за весь период наблюдений

Картину накопленной дополнительной осадки по площади за 14 лет наблюдений показывают построенные изолинии на рис. 6.

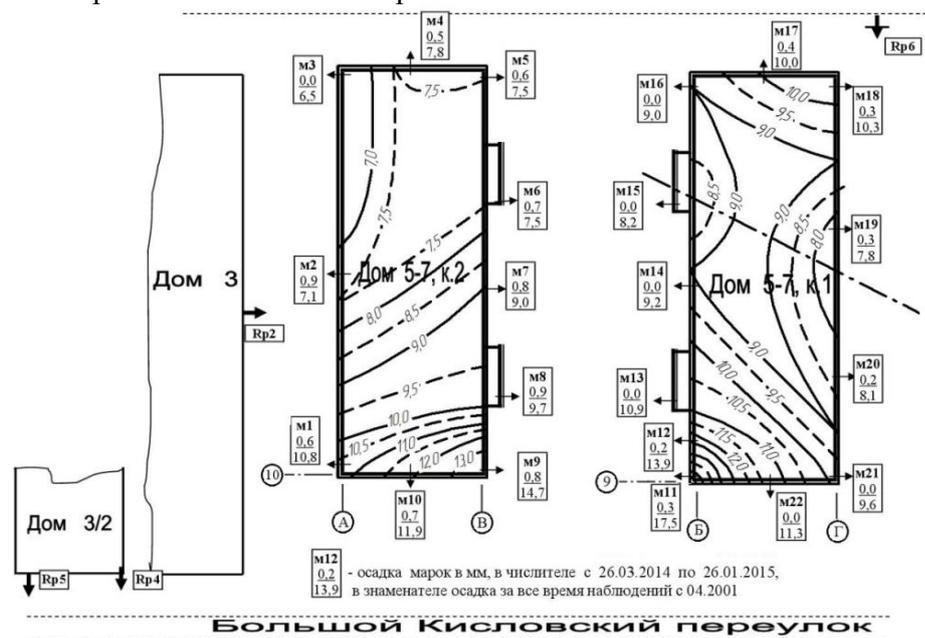


Рис. 6. Изолинии осадок на январь 2015 г.

За неполные 14 лет с начала наблюдений наибольшую осадку 17,5 мм (марка № 11) получил угол корпуса 1 в осях Б-9. В пределах восточного торца корпуса 1, по оси 9 разница осадок составила 7,9 мм. Остальные марки на корпусе 1 показали осадку 7,8 – 10,9 мм.

На рис. 6 мной была проведена условная штрихпунктирная ось для того, чтобы показать характер деформаций корпуса 1 на 2015 г., а именно разделение здания на отдельные блоки, которые оседают с разными скоростями. Основание испытывает неравномерную нагрузку в связи с работой верхних конструкций в качестве балки на одной

опоре (центральная ось здания между лестничными клетками) и двух консолей над суффозионно ослабленными частями массива основания.

Наблюдения за осадками показали, что корпус 2 деформируется, как и корпус 1 в разных частях неоднородно, что приводит к общему искривлению плоскости основания. По данным нивелировки наибольшая осадка 14,7 мм произошла угла по оси В-10. Разница осадок по восточному торцу составляет 3,9 мм. Это в 2 раза меньше, чем на корпусе 1. Остальные марки на корпусе 2 показывают примерно одинаковую накопленную осадку 6,5 – 9,7 мм.

На иллюстрации деформаций зданий видно, что лидируют два прилежащих угла зданий, обрисовывая карстово-суффозионную зону между домами со стороны Большого Кисловского переулка.

В период усиления фундамента и основания летом 2015 г. проводились геодезические наблюдения за деформациями корпуса 1. Осадки зданий при построении графиков и изолиний не учитывались т.к. принималось во внимание, что работы по усилению фундаментов неминуемо сопровождаются дополнительными, так называемыми «технологическими» осадками фундаментов.

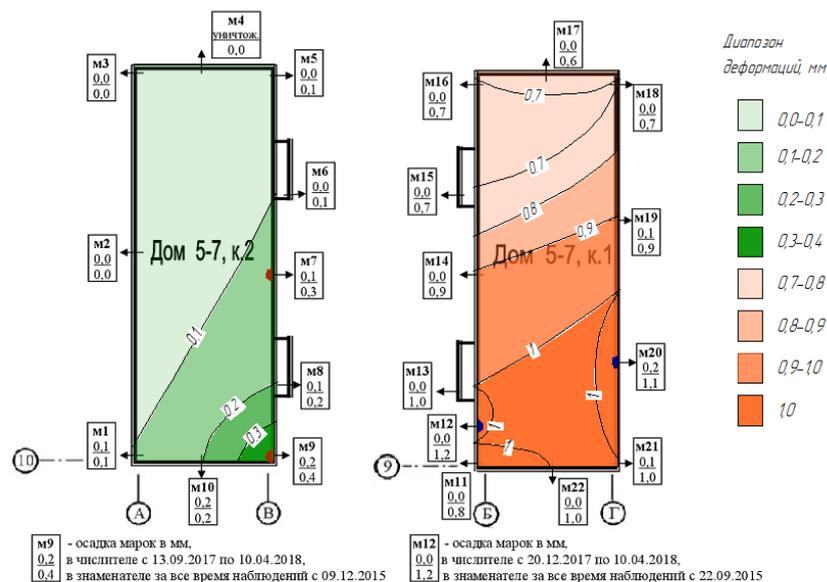
Для того чтобы получить более полное и достоверное представление о возможных деформационных процессах, об эффективности такого закрепления систематические наблюдения осадок здания продолжились после окончания комплекса мероприятий укрепления фундамента инъекциями (сентябрь 2015 г.), геодезический мониторинг ведется по настоящее время.

Данные по осадкам наружных стен здания за сентябрь 2015 – март 2017 гг. свидетельствует о продолжении осадок – снова опережает юго-восточный угол здания, который испытывал наибольшие деформации и был укреплен большим количеством грунтоцементных свай, которые устраивались с шагом 1,5 м, тогда как в остальных частях дома шаг составил 3,0 м.

После укрепления максимальная накопленная осадка 1,2 мм наблюдается на марке №12. Скорость осадки во времени  $v_{ср}$  равна 0,69 мм/год. Отметим, что марка № 11, которая первенствовала по величине осадки до усиления, показывает 0,8 мм. В пределах восточного фасада корпуса 1 высотная деформация после укрепления достигла 1,0 мм. Скорость осадки М13, М21, М22 одинакова и равна 0,46 мм/год. Таким образом, разность осадок по данному торцу 0,4 мм. Противоположная западная часть здания деформируется незначительно и равномерно. По маркам №№ 15, 16, 18 осадка одинакова и составляет 0,7 мм. В центральной части здания наблюдаем накопленную осадку, равную 0,9 мм (М14, М19).

Закрепление основания и кладки фундаментов привело к перелому графиков осадок. После усиления скорости погружения уменьшились вдвое, по марке № 11 – почти в 3 раза. В последующий год произошла стабилизация деформаций. За 4 цикла устанавливаем полное прекращение осадок по всем маркам.

Основание корпуса 1 омоноличено, дом больше не расчленен на блоки, садится равномерно, нет разнонаправленных движений. Исключение только составляет марка № 12, расположенная в районе крыльца рядом с восточным эркером между осями 8-9/Б, которая локально деформируется больше остальных. Имеется наклон опускания в одну сторону с северо-запада на юго-восток, что связано с деятельностью воронки, расположенной между домами.

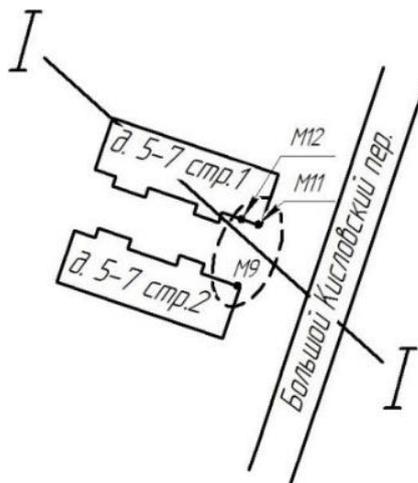


**Большой Кисловский переулок**

**Рис. 7.** Изолинии осадок после укрепления фундамента корп. 1

Корпус 2 не подвергся укреплению инъекциями, однако с января 2015 г. устанавливаем, что осадки перестали увеличиваться по всем маркам и долгое время показывали 0,0 мм. На протяжении трех с небольшим лет получил осадку равную 0,4 мм угол здания в осях В-10, ближайший к проезжей части.

Итак, рассмотрев геологические процессы, протекающие на данном участке, определили местонахождение карстово-суффозионной воронки в восточной части площадки между домами (Рис. 8). Она имеет эллиптическую форму, захватывает зеркально расположенные углы двух домов. Деятельность обширно развивающейся КСВ в этой зоне постоянно проявляется как на здании, так и на поверхности земли: трещина между бортовым камнем и бетонной заливкой, проседание асфальтового покрытия, деформации пола подвала, вынос материала из-под основания здания и как следствие зафиксированный отрыв грунта от подошвы фундамента, максимальные осадки марок №№ 11 и 9 по данным длительных геодезических наблюдений. Центр воронки смещен в сторону корп. 1, который вследствие этого испытывает наибольшие деформации.



**Рис. 8.** Предполагаемый контур КСВ

Исходя из существующих фактов, необходимо откорректировать инженерно-геологический разрез (ООО «Инжэко центр»), показав гидрогеологическое окно, кото-

рого нет на исходном разрезе. В нашем варианте литологическое окно расположено между скважинами №№ 37 и 40 (1980 г.) по середине. Наличие окна подтверждается резким снижением УГВ в районе воронки от ЭДЗ-6 к скважине № 40. Снижение уровня воды к воронке идет как с северной, так и с южной стороны. Через гидрогеологическое окно происходит вертикальная фильтрация воды и перетекание из одних водоносных горизонтов в другие.

В заключении отметим, что на протяжении всего периода наблюдений за деформациями корпусов 1 и 2 они испытывают осадку в связи с протекающим на территории ЖК «Кисловское» карстово-суффозионным процессом.

Скорость осадки марок по корпусу 1 после закрепления фундамента и основания снизилась с 1,28 мм/год до 0,37 мм/год по лидирующей марке. Произошло выравнивание осадок различных частей здания в связи с закреплением; разность осадок различных марок за 2,6 года после инъекций составляет 0,6 мм, тогда как за тот же период до инъекций она составляла 2,9 мм. Осадки корпуса 1 дома 5 по Б. Кисловскому переулку не полностью прекратились после инъекций, в связи с чем продолжается рост ранее заложённых в несущих конструкциях вертикальных осадочных трещин со скоростью порядка 0,1 мм/год по наиболее активным трещинам. Мониторинг за деформациями копр. 1 ЖК «Кисловское» после закрепления основания и фундамента копр. 1 в целом показал несомненную эксплуатационную пригодность жилого дома, памятника истории, и техническую эффективность проведенного закрепления грунтов.

Скорость осадки по лидирующей марке корпуса 2 на протяжении 2001-2014 года составляла 1,06 мм/год, с 2014 года по настоящее время (апрель 2018) она снизилась до 0,2 мм/год, что в два раза меньше, чем по корпусу 1 после его укрепления. В 2015-2017 годах геодезический мониторинг фиксировал стабильность большинства марок на корпусе 2 и незначительную осадку некоторых марок. Необходимость в укреплении его фундаментов, основания и несущих конструкций на текущий момент отсутствует.

## Литература

1. Научно-технический отчет по теме: «Обследование строительных конструкций и грунтов основания здания по адресу: г. Москва, Б. Кисловский пер., д. 5, стр. 1», Министерство образования Российской Федерации МГСУ, рук. С.Н. Чернышев; отв. исполн.: Б.А. Гранит, М., 1999. – 193 с. – Арх. № /363-99.
2. Техническое заключение о дополнительном обследовании грунтов основания жилого 4-х этажного здания с подвалом по адресу: Б. Кисловский пер., д. 5-7, стр. 1 в г. Москве, ООО «ИГЦ», рук. Б.А. Гранит, отв. исполн.: В.В. Буянов, М., 2012. – 33 с. – Договор № 15/12 от 01.02.2012 г.
3. Заключение по обследованию потенциальной карстовой опасности участка жилых домов, расположенных по адресу: Большой Кисловский пер., д. 5, стр. 1, 2, ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», рук. А.С. Алешин, М., 2003. – 49 с. – Договор № 02-03(К).
4. Проектная документация «Комплекс мероприятий по реконструкции и усилению фундаментов здания по адресу: Москва, ЦАО, Б. Кисловский пер., д. 5, стр. 1». Раздел 1. Конструктивные и объемно-планировочные решения. Рабочая документация, ООО «Горгеострой», рук. А.И. Панченко, М., 2015. – 16 с. – Договор № 01-М-2015-КР.
5. Технический отчет по результатам обследования фундаментов и грунтов основания здания, расположенного по адресу: г. Москва, Б. Кисловский пер., д. 5-7, стр. 1, ООО «Инжиниринговый Геотехнический Центр», рук. Ю.В. Брызгалин, М., 2015. – 26 с. – Договор № 27/15 от 07.10.2015 г., доп. согл. №1 от 14.10.2015 г.

## ОЦЕНКА КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НОВЫХ ЛИНИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА В МОСКВЕ

Аникеев А.В., Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г.

*(Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва)*

**Аннотация:** На примере участка в центре Москвы изложены основные принципы оценки опасности развития процессов, связанных с карстом, для строящихся линий метрополитена. Приведены результаты районирования территории по механизмам возможного развития карстово-суффозионного процесса. Даны расчетные модели для определения диаметра провалов.

**Ключевые слова:** инженерно-геологические условия, карстово-суффозионная опасность, объекты метро, провалы, районирование.

**Введение.** В настоящее время в Москве активно ведется проектирование и строительство новых линий метрополитена. Инженерно-геологические изыскания по их трассам требуют научного сопровождения, одной из основных задач которого является оценка карстово-суффозионной опасности, под которой понимается опасность образования воронок в покровной толще закарстованных массивов и на дневной поверхности. Важность этой задачи обусловлена тем, что Москва находится на территории покрытого карбонатного карста, 16 % площади которой занимают потенциально опасные в карстово-суффозионном отношении районы. Причем мощность, состояние, свойства нерастворимых грунтов и подстилающих их растворимых пород в этих районах изменяются в широких пределах.

Разработанная процедура оценки карстово-суффозионной опасности рассматривается на примере участка Калининско-Солнцевской линии "Третьяковская" – "Волхонка" – "Деловой центр" протяженностью около 5.7 км. Начало строительства (станция "Третьяковская") находится на правом берегу Водоотводного канала. Линия метро пересекает канал и трижды пересекает р. Москву. Конец строительства запроектирован в районе ММДЦ Москва-Сити.

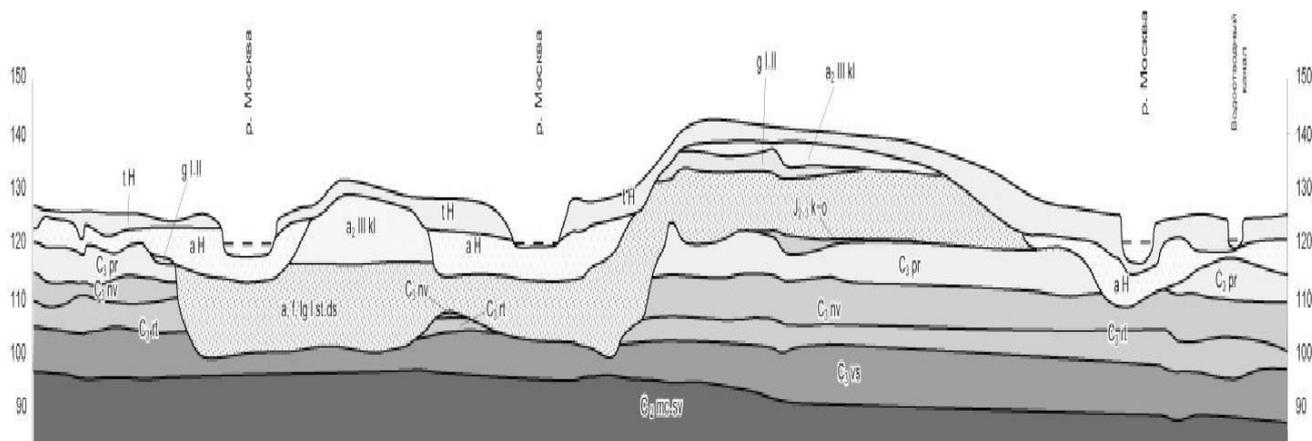
На «Карте опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов» масштаба 1 : 10 000, входящей в комплект крупномасштабных геологических карт г. Москвы, участок относится к потенциально опасной категории по опасности современных карстово - суффозионных процессов и к опасной категории по опасности древних карстовых форм. То есть в пределах этой территории при определенных условиях возможны деформации земной поверхности, связанные с карстом.

### **Инженерно-геологические условия**

Территория строительства захватывает пойму, вторую (мневниковскую) и третью (ходынскую) надпойменные террасы р. Москвы. Абсолютные отметки земной поверхности изменяются от 123.6 м на пойме до 142.5 м на третьей надпойменной террасе. Это исторический центр города, где естественная поверхность практически полностью изменена строительной планировкой. Южнее Храма Христа Спасителя проектируемая трасса идет по долине заключенного в подземный коллектор ручья Черторый. Вдоль трассы встречаются и другие в настоящее время засыпанные более мелкие водотоки. Мощность насыпи здесь достигает 6–7 м.

Геологическое строение территории строительства обусловлено её расположением в долине современной р. Москвы и в центральной части древней доледниковой долины (рис.1). Здесь дочетвертичные отложения подверглись интенсивному размыву, и в четвертичное время произошло накопление песчаной толщи водноледниковых и аллюви-

альных отложений. Её мощность на большей части трассы составляет 20–30 м. Пески преимущественно подстилаются верхнекаменноугольными терригенно-карбонатными породами, среди которых вдоль трассы преобладают трещиноватые и закарстованные известняки. К четвертичным пескам и верхнекаменноугольным известнякам приурочены горизонты подземных вод, имеющие напорно-безнапорный характер. Вблизи русла р. Москвы территория подтоплена.



**Рис. 1.** Геологический разрез участка Калининско-Солнцевской линии метрополитена от станции «Третьяковская» до станции «Деловой Центр».

Четвертичные отложения: tH – современные техногенные образования, aH – современный аллювий поймы, a<sub>2</sub>IIIkl – верхнечетвертичные аллювиальные отложения II надпойменной террасы р. Москвы, gI-II – морена донского и московского горизонта, a, f, lgIst-ds – нижнечетвертичные водноледниковые отложения. Юрские отложения: J<sub>2-3</sub>k-o – средне-верхнеюрские отложения келловейского и оксфордского ярусов. Верхнекаменноугольные отложения: C<sub>3</sub>pr – перхуровская толща, C<sub>3</sub>nv – неверовская толща, C<sub>3</sub>rt – ратмировская толща, C<sub>3</sub>vs – воскресенская толща. Средне- и верхнекаменноугольные отложения: C<sub>2-3</sub>ms-sv – мячковский горизонт и суворовская толща кривякинского горизонта.

### Районирование территории по особенностям образования воронок

По степени карстово-суффозионной опасности вся территория отнесена к потенциально опасной категории, поскольку карбонатные отложения каменноугольной системы перекрыты либо песчано-глинистыми четвертичными отложениями, либо юрскими и каменноугольными глинистыми слабопроницаемыми породами мощностью менее 10 м. Составлена карта районирования территории строительства по особенностям развития карстово-суффозионного процесса. Легенда к карте приведена в таблице 1. Выделено 5 районов, геологическое строение которых обусловило выбор расчетных моделей и расчетных параметров для определения диаметра карстово-суффозионных провалов.

*Район 1.* Глинистые дочетвертичные породы отсутствуют. На карбонатных отложениях залегают песчано-глинистые отложения четвертичной системы.

К этому району отнесена большая часть территории. Она приурочена к местам выхода на дочетвертичную поверхность перхуровских, реже – измайловских, ратмировских или мячковско-суворовских известняков. Породы сильно разрушены и закарстованы, в верхних горизонтах представлены щебнем и дресвой, иногда – мукой.

*Район 2.* На известняках залегают глины каменноугольного возраста, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями. Мощность каменноугольных глин не превышает 3 м.

*Район 3.* На известняках залегают глины каменноугольного возраста, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями. Мощность каменноугольных глин составляет 3-10 м.

*Район 4.* На известняках каменноугольного возраста залегают юрские глинистые отложения мощностью до 3 м, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями.

*Район 5.* На известняках каменноугольного возраста залегают юрские глинистые отложения мощностью 3-10 м, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями.

**Таблица 1**

**Легенда к карте районирования по особенностям развития карстово-суффозионного процесса**

Строение терригенной толщи, перекрывающей закарстованный массив	Мощность слабо-проницаемого глинистого слоя	Станции метро и средний диаметр возможных провалов на участке их расположения
На известняках залегают четвертичные песчано-глинистые отложения	0 м	«Деловой центр»: $D_{cp} = 3.2$ м, «Волхонка»: $D_{cp} = 2.4$ м
На известняках залегают каменноугольные глины, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями	0–3 м	–
	3–10 м	«Кутузовский проспект»: $D_{cp} = 4.0$ м
На известняках залегают юрские глины, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями	0–3 м	«Плющиха»: $D_{cp} = 4.9$ м, «Волхонка»: $D_{cp} = 4.2$ м
	3–10 м	–

**Определение диаметра провалов**

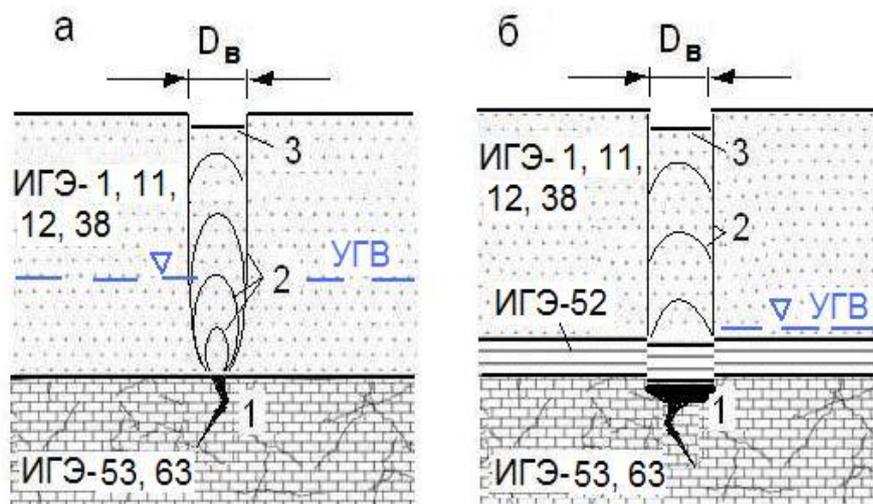
На рассматриваемом отрезке трассы проектируемая линия метрополитена целиком проходит в скальных и полускальных грунтах верхнего и среднего карбона. Поэтому карстово-суффозионной опасности, под которой в настоящее время обычно понимается угроза образования провалов покровной толщи закарстованных массивов, подвержены приповерхностные сооружения – вестибюли станций, переходы между ними, эскалаторные, вентиляционные шахты и другие. Применительно к тоннельным сооружениям речь может идти лишь о карстово-обвальной опасности, вызванной обрушением растворимых и нерастворимых пород в основании тоннеля. Но эта опасность здесь практически исключается, так как крупные открытые карстовые полости, способные инициировать обрушение, в ходе изысканий не обнаружены. На их отсутствие указывает и анализ фондовых материалов. Судя по описанию колонок буровых скважин, вдоль этого отрезка трассы не зарегистрированы даже небольшие по глубине (0.1–0.2 м) провалы бурового снаряда.

На основе анализа инженерно-геологических условий и факторов образования карстово-суффозионных провалов выполнены расчеты устойчивости массива на участках четырех станций проектируемого отрезка Калининско-Солнцевской линии – «Волхонка», «Плющиха», «Кутузовский проспект» и «Деловой Центр». Именно для них дан прогноз размеров карстово-суффозионных воронок, формирование которых возможно в покровной толще закарстованных массивов и на земной поверхности.

**Станция «Волхонка»**

Результаты схематизации массива пород на этом участке представлены на рисунке 2. Рабочая гипотеза, тесно связанная с результатами схематизации, заключается в сле-

дующем. На большей площади участка имеет место свободная суффозия массы, то есть истечение водонасыщенных песков в трещинно-карстовые коллекторы в гидростатических условиях под действием собственного веса (рис. 2, а). При этом реализуется вторая форма движения несвязных грунтов, и канал истечения сильно расширяется в нижней части. Выше УГВ в результате последовательного образования сводов обрушения возникает трубообразный канал, характеризующий первую форму течения песков. Точно такой же канал формируется и там, где в разрезе изредка присутствует разделяющий глинистый пласт, а отметки УГВ практически совпадают с отметками кровли этого пласта. Отличие лишь в том, что здесь для формирования канала требуется разрушение экранирующего слоя (рис. 4, б).



**Рис. 2.** Механизм развития карстово-суффозионного процесса, рабочая гипотеза и схемы образования воронок на участке станции «Волхонка» для случаев однослойной (а) и двухслойной (б) покровной толщи: 1 – ослабленный участок закарстованных пород; 2 – канал течения и обрушения песков (а) или обрушения глин и песков (б) на разных стадиях развития процесса; 3 – свежий провал земной поверхности; 4 – первичный свод обрушения в песках, под действием веса которого происходит смещение глин. ИГЭ – инженерно-геологические элементы, выделенные в ходе изысканий.

Размер провалов в основании приповерхностных сооружений метрополитена и на земной поверхности для случая, показанного на рисунке 2а, рассчитывался с помощью модели свободной суффозии массы [1, 6]. Рассматривался наихудший сценарий развития процесса, и в качестве расчетного принимался максимальный диаметр канала в соответствии с выражением [1]:

$$D_{\text{в}} = D_{\text{к}} = D(1 + \sin \varphi)^2 / 4 \sin^3 \varphi, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр или пролет ослабленного участка,  $\varphi$  – угол внутреннего трения песков.

Результаты расчетов показаны в таблице 2, из которой следует, что по значениям  $(D_{\text{в}})_{\text{ср}}$  и  $(D_{\text{в}})_{\text{макс}}$  большая часть площадки относится к категории Г [3, 4]. При этом необходимо отметить, что в соответствии с консервативным подходом к оценке устойчивости использовались наименьшие значения  $\varphi$ , полученные при изысканиях с доверительной вероятностью 0.95. Учитывалось также, что в нижней части покровной толщи, где возможно расширение канала, залегают пески лишь трех элементов: ИГЭ-11, 12, 38. Кроме того, открытые полости на участке не обнаружены, поэтому в качестве расчетного значения ширины ослабленного участка  $D$  на основании того же консервативного подхода принималось среднее значение глубины провалов бурового снаряда в карбонатных породах на территории Москвы.

Для случая, показанного на рисунке 2б, определение диаметра канала, а значит, и воронки сводится к определению ширины зоны обрушения глин (ИГЭ-52). При этом в рассматриваемых условиях целесообразно использовать модифицированную модель среза экранирующего пласта по кругу цилиндрической поверхности [1, 6]. Согласно этой модели диаметр сквозного отверстия в слабопроницаемых водонасыщенных грунтах, испытывающих перетекание подземных вод, равен:

$$D_{в} = D_{к} = D = 2Gm[(1 + 2(\gamma_1^* m \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \xi_1 + C) \operatorname{tg} \varphi_2 / \gamma_2' G^2 m)^{0.5} - 1], \quad (2)$$

где  $G = (\gamma_1^* \operatorname{tg} \varphi_2 - \gamma_2' \operatorname{tg} \varphi_1 \xi_1) / \gamma_2'$ . Нижними индексами «1» и «2» здесь обозначены показатели свойств нижнего и верхнего слоев модели:  $\gamma$  – объемный вес,  $\operatorname{tg} \varphi$ ,  $\xi$  – коэффициенты трения и бокового распора. Нижний глинистый слой характеризуется также мощностью  $m$  и сцеплением  $C$ . Гидродинамическое воздействие на него учитывалось в виде объемных сил, которые увеличивают или уменьшают фиктивный вес глин:  $\gamma_1^* = \gamma_1' \pm \gamma_w I$ , где  $\gamma_1'$  – объемный вес взвешенного в воде грунта,  $I = \pm \Delta H / m$  – градиент перетекания,  $\gamma_w \approx 10 \text{ кН/м}^3$  – вес воды. Вес полностью водонасыщенного грунта (связного или несвязного) рассчитывался по формуле  $\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w) / (1 + e)$ , где  $\gamma_s$  – вес минеральной части,  $e$  – коэффициент пористости. Выше УГВ в уравнение (2) вводится объемный вес влажных грунтов  $\gamma$ .

**Таблица 2**

**Результаты определения диаметра карстово-суффозионных воронок  $D_{в}$  на участке станции «Волхонка» с использованием расчетной модели суффозии массы (1)**

№ ИГЭ	Ширина ослабленного участка ( $D$ )	Угол трения песков ( $\varphi$ )	Диаметр ( $D_{в}$ )	Среднее значение ( $D_{в}$ ) <sub>ср</sub>
	м	град.	м	
11, 12	0.5	28	2.6	2.4
38		31	2.1	

Результаты расчетов показаны в таблице 2, из которой следует, что по значениям  $(D_{в})_{ср}$  и  $(D_{в})_{\max}$  большая часть площадки относится к категории Г [3, 4]. При этом необходимо отметить, что в соответствии с консервативным подходом к оценке устойчивости использовались наименьшие значения  $\varphi$ , полученные при изысканиях с доверительной вероятностью 0.95. Учитывалось также, что в нижней части покровной толщи, где возможно расширение канала, залегают пески лишь трех элементов: ИГЭ-11, 12, 38. Кроме того, открытые полости на участке не обнаружены, поэтому в качестве расчетного значения ширины ослабленного участка  $D$  на основании того же консервативного подхода принималось среднее значение глубины провалов бурового снаряда в карбонатных породах на территории Москвы.

**Таблица 3**

**Результаты определения диаметра провалов  $D_{в}$  на участке станции «Волхонка» по схеме смещения грунтового цилиндра с использованием уравнения (2)**

Расчетные характеристики нижнего (1) и верхнего (2) слоев модели						$D_{в}$	$(D_{в})_{ср}$
Слой 1 (ИГЭ-52)			Слой 2 (ИГЭ-38)				
$m,^*$ м	$\gamma_1,$ кН/м <sup>3</sup>	$C,$ кПа	$\varphi_1,$ град	$\gamma_2,$ кН/м <sup>3</sup>	$\varphi_2,$ град	м	
0.8	17.5	47	13	18.7	31	3.8	4.2
1.2						4.6	

*Примечание. \* Значения мощности по скважинам 28028 и 28030*

Расчетные значения показателей свойств (с доверительной вероятностью 0.95) и результаты расчетов приведены в таблице 3. Видно, что при наличии в разрезе экранирующего слоя диаметр карстово-суффозионных провалов заметно увеличивается. Однако распространение глин ИГЭ-52 на участке станции «Волхонка» крайне ограничено. Поэтому к среднему значению диаметра 4.2 м, показанному в таблице 3, следует относиться как к максимально возможному показателю опасности:  $(D_{в})_{\max} = 4.2$  м. А наиболее вероятным средним значением может служить значение  $(D_{в})_{\text{ср}} = 2.4$  м (табл. 2). И окончательно устойчивость площадки согласно нормативным документам по среднему значению диаметра провалов определяется категорией Г ( $\leq 3$  м), а по максимальному – В ( $3 \text{ м} < D \leq 10 \text{ м}$ ).

#### **Станция «Плющиха»**

На этом участке схематизированный разрез полностью соответствует тому, что показан на рисунке 2б. Несвязные грунты подстилаются экранирующими глинами (ИГЭ-52) достаточно малой мощности, для которых вполне корректна модель среза (2).

Некоторые отличия от участка станции «Волхонка», связанные с мощностью экрана, свойствами перекрывающих его песков и гидрогеологическими условиями, не вносят принципиальных изменений в расчетную схему. Поэтому ограничимся лишь общим выводом о том, что здесь средний и максимальный диаметры прогнозируемых воронок соответственно в 2 и 1.5 раза больше:  $(D_{в})_{\text{ср}} = 4.9$  м и  $(D_{в})_{\max} = 6.3$  м. По этим значениям  $D_{в}$  участок станции «Плющиха» относится к категории В [3, 4].

#### **Станция «Кутузовский проспект»**

Покровная толща здесь также двухслойная, но подстилают ее не породы верхнего карбона, а нерасчлененная толща известняков и доломитов суворовской толщи верхнего (ИГЭ-73) и подольско-мячковского горизонта среднего (ИГЭ-74) карбона. Их аккумуляционная емкость практически не ограничена. Нижний экранирующий пласт сложен глинистыми отложениями воскресенской толщи верхнего карбона (ИГЭ-70) Ее мощность, что очень важно, достигает 7.7 м. При этом модель среза даже в применявшейся выше модификации перестает быть корректной.

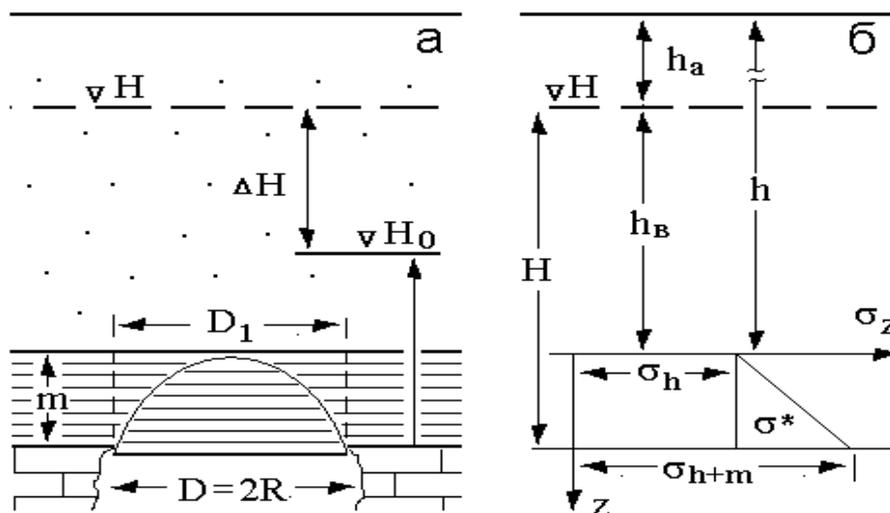
В этом случае хорошей альтернативой модели Бирбаумера – среза столба пород [5, 7] – может служить модель обрушения параболического свода [2], отражающая реальный механизм образования провалов. Для решения нашей задачи – оценки диаметра окна в водоупоре – она записывается в виде [1]:

$$D_1 = 2m \cdot (\text{tg} \varphi_1 + C/\sigma_z), \quad (3)$$

где  $C$  и  $\varphi_1$  – сцепление и угол трения глин;  $\sigma_z = \sigma_h + \sigma^* = \sigma_{h+m}$ ;  $\sigma_h = \gamma_2 h_a + \gamma_2' h_b$ ;  $\gamma_2$ ,  $\gamma_2'$  – вес влажных и взвешенных в воде песков;  $h_a = h + m - H$  и  $h_b = H - m$  – их мощность;  $\sigma^* = \gamma_1^* m$  (см. рис. 2). Силовое воздействие подземных вод, как и раньше, учитывалось в фиктивном объемном весе экранирующего слоя:  $\gamma_1^* = \gamma_1' + \gamma_w I$ .

Первая форма движения песков, показанная на рисунке 2б, реализуется в достаточно крупных или плотных песках при их постепенном истечении в полость-приемник, а также во влажных несвязных грунтах или в песках не очень большой мощности независимо от их свойств, состояния и интенсивности гидродинамического воздействия. При этом диаметр свежего провала  $D_{в}$  на земной поверхности или в основании сооружения примерно равен диаметру «окна»  $D_1$  в слабопроницаемом разделяющем слое (рис. 3).

Именно такая ситуация прогнозируется на участке станции «Кутузовский проспект», где низы разреза несвязных грунтов сложены крупными плотными и, следовательно, «прочными» песками ИГЭ-39. Учитывая также, что мощность песчаной толщи  $h$  не очень велика по сравнению с диаметром отверстия  $D_1$ , полагаем, что и здесь значение  $D_1$  служит расчетным значением диаметра воронки (рис. 3, см. также рис. 2б).

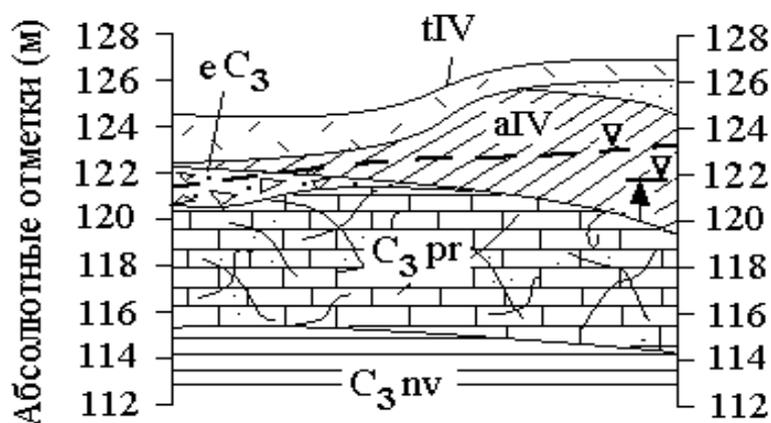


**Рис. 3.** Схема к определению диаметра сквозного отверстия  $D_1$  при обрушении экранирующего слоя в пределах параболического свода высотой  $m$  (а) и эпюра вертикального давления слабопроницаемых грунтов (б):  $\sigma^*$  – фиктивные (с учетом гидродинамического воздействия) напряжения от веса глин;  $H, H_0$  – уровни подземных вод.

Результаты расчетов свидетельствуют об очень близких значениях  $D_B$  на участках станций «Кутузовский проспект» и «Плющиха», которые находятся в разных инженерно-геологических условиях. Причины такого совпадения – предмет самостоятельного исследования и отдельной публикации. Поэтому ограничимся констатацией того факта, что по значениям  $(D_B)_{cp} = 4.0$  м и  $(D_B)_{max} = 6.0$  м участок станции «Кутузовский проспект» относится к категории В [3, 4].

#### Станция «Деловой Центр»

Двухслойное строение покровной толщи – слой связных грунтов (СГ) в подошве и – несвязных (НГ) с поверхности – наблюдается и в окрестности станции «Деловой Центр» (рис. 4). Это, впрочем, неудивительно, так как схема «СГ–НГ», иногда повторяющаяся вверх по разрезу (СГ–НГ–СГ–НГ и т.д.), является основной для территории Москвы. Обратная последовательность (НГ–СГ–НГ–СГ) имеет место, но карстово-суффозионные провалы, по образному выражению Л.Г. Черткова, на таком месте в Москве не имеют места.



**Рис. 4.** Схематическое строение массива пород на участке станции «Деловой центр»: tIV – техногенные преимущественно песчаные грунты; aIV – аллювиальные суглинки с прослоями супесей и песков;  $C_{3pr}, C_{3nv}$  – перхуровская карбонатная и неверовская глинистая толщи верхнего карбона;  $eC_3$  – элювий карбонатных пород. Пунктирной линией и стрелкой показаны уровни грунтовых и трещинно-карстовых вод.

На этом участке средняя (по колонкам 8-ми пробуренных скважин) мощность разделяющего слоя оказалась равной  $m_{cp} = 2.6$  м, максимальная –  $m_{max} = 5.3$  м. Опасность провалообразования, количественно выраженная величиной диаметра возможной воронки, при этих значениях  $m$  определялась с использованием уравнений (2), (3). Зависимость (1), предсказывающая сильное увеличение диаметра канала над окном в водопоре, не применялась, так как по целому ряду признаков реализация 2-й формы течения грунтов здесь исключается.

Вычисления показывают, что при  $m_{cp} = 2.6$  м, диаметр возможных провалов лежит в интервале  $(D_v)_{cp} = 2.7–3.7$  м, а при  $m_{cp} = 5.3$  м –  $(D_v)_{max} = 4.4–5.2$  м. Вероятность же реализации этих провалов нам неизвестна и вряд ли может быть установлена при существующем уровне знаний о распределении подземных карстовых форм по размерам. Поэтому, считая сценарии, положенные в основу расчетов, равновероятными, получим:  $D_{cp} = (2.7 + 3.7)/2 = 3.2$  м,  $D_{max} = (5.2 + 4.4)/2 = 4.8$  м. При этом участок станции «Деловой центр» относится к категории В ( $3 \text{ м} < D \leq 10 \text{ м}$ ).

### **Заключение**

Размер возможных провалов в основании сооружения является одним из важнейших показателей при выборе проектных решений и защитных мероприятий. Для линий метрополитена, характеризующихся большой протяженностью, выбору расчетной модели всегда должно предшествовать районирование территории, позволяющее выделить участки, в пределах которых карстово-суффозионный процесс будет развиваться по определенному механизму. Такой подход к оценке карстово-суффозионной опасности был использован, например, в рамках работ по научному сопровождению инженерно-геологических изысканий на участке Калининско-Солнцевской линии от станции Третьяковская до станции Деловой Центр, результаты которых представлены в настоящей статье.

### **Литература**

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. Москва: РУДН, 2017. 328 с.
2. Протодяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч. 1. Давление горных пород. Изд. 3-е. М.: Госгориздат, 1933. 127 с.
3. СП 11-105-97. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов / Госстрой РФ. М., 2000. 99 с.
4. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 / Минрегион России. М., 2012. 60 с.
5. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. Пер. с англ. М.: Госстройиздат, 1958. 503 с.
6. Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003.
7. Шахунянц Г. М. Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчета. М.: Трансжелдориздат, 1953. 827 с.

## БУФЕРНЫЕ ЗОНЫ В СОСТАВЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА ЛЕССОВЫХ МАССИВОВ, КАК НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ЕГО УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Лаврусевич А.А.<sup>1</sup>, Лу Шенпин<sup>2</sup>, Лаврусевич И.А.<sup>1</sup>, Кузнецова О.Г.<sup>1</sup>,  
Лукьянова Ю.Н.<sup>1</sup>

*(1-НИУ МГСУ, г. Москва, 2-Технологический университет, Шанхай, Китай)*

**Аннотация:** Проектирование буферных зон сооружений в составе экологического каркаса биогеоценоза, при строительстве на лессовых массивах, является необходимым условием нормального функционирования сооружения на протяжении всего жизненного цикла. Если устранением таких опасных феноменов как псевдокарст, просадочность и эрозия занимаются на стадии проектирования и строительства, то развитие и проявление этих процессов в период эксплуатации в буферных зонах может вызвать деформации и даже полное разрушение сооружения. Поэтому, необходим мониторинг за состоянием буферных зон, которые разграничивают техногенно измененные территории (ТИТ) и ядра экологического каркаса, для принятия превентивных мер уменьшающих негативное воздействие опасных геологических процессов природного и техногенного генезиса.

**Ключевые слова:** экологический каркас, буферные зоны, лессовые массивы, техногенно измененные территории, лессовый псевдокарст, просадочность, эрозия.

Лессы – уникальное творение Природы. Обладая особыми, эфемерными свойствами они выделяются из всего многообразия образований четвертичного периода. Действительно, такие свойства как пористость, низкая влажность, наличие неустойчивых структурных связей, карбонатность, способность держать вертикальные откосы до 100 м. и более, способность к псевдокарстованию, просадочность, малое количество легкорастворимых соединений и др. характерны только для лессовых пород. Лессовые грунты, являются той литогенной основой, на которой возводятся многочисленные здания и сооружения. С лессами связано исключительное плодородие почв (они, в частности, являются материнской породой черноземов), позволяющих получать богатые урожаи сельскохозяйственных культур – проса, гаоляна, пшеницы, плодово-ягодных, а при орошении и ценнейших хлопковых культур.

Лессовые породы плащеобразно покрывают около 10% (более 13 млн. км<sup>2</sup>) поверхности более древних пород материковой части планеты и создают свой, особенный лессовый ландшафт. Лессовые ландшафты являются гетерогенными территориями, состоящими из групп взаимодействующих экосистем (не менее нескольких километров в диаметре), которые закономерно повторяются в пространстве [1].

Строительство сооружений на лессовых массивах приводит к преобразованию природных ландшафтов в техногенные. Это вызывает необходимость проведения целого комплекса мероприятий по устранению развития таких опасных геологических феноменов как псевдокарст, просадочность, развитие оползней, оврагообразование и др. В связи с этим, остаются актуальными вопросы общей геоэкологической оценки состояния лессового массива в целом.

На предпроектной стадии, рассматривая массив лессовых пород как основную среду жизни сооружения необходимо учитывать все многообразие особенностей лессовых пород. Учитывая, что строительство и эксплуатация любого сооружения на лессовом массиве приводит к нарушению его геоэкологической устойчивости, возникает необходимость проектирования так называемых буферных зон – разграничивающих сооружение и основной лессовый массив.

Понятие буферных зон появилось еще в XV-XVI вв. в Европе. В 1930–е гг. в США была закреплена стандартная форма проектирования и применения буферных зон [1]. В последнее время, концепция проектирования буферных зон в основном ориентирована на смягчение негативного воздействия техногенно нарушенных территорий представленными населенными пунктами, промышленными предприятиями, полигонами карьерных выработок (кирпичные заводы), гидротехническими сооружениями и др. [2,3]. То есть, буферные зоны выступают своеобразными трансграничными геоэкологическими зонами снижающими техногенное воздействие [4,5].

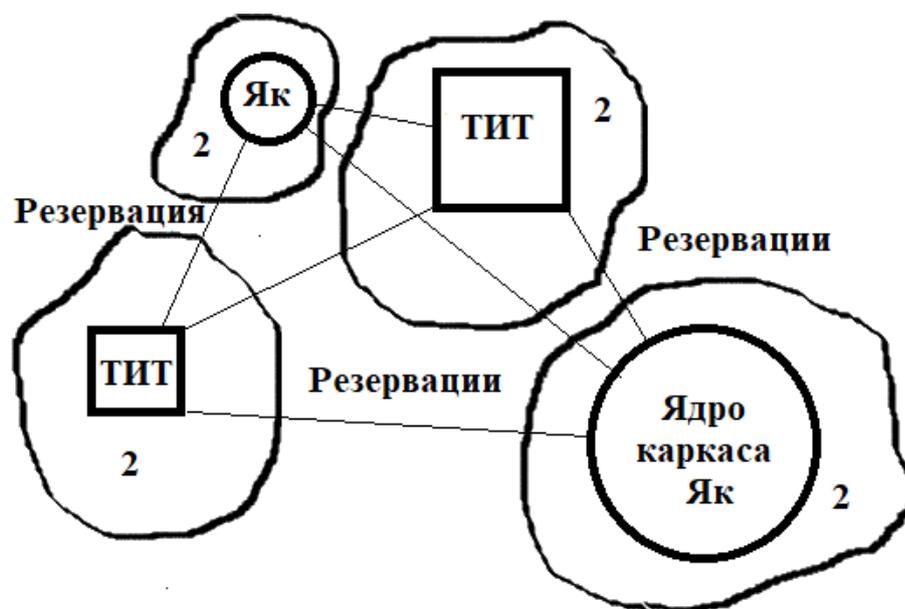
В связи с этим необходим мониторинг территорий, в рамках которого должно осуществляться систематическое наблюдение и прогнозирование изменений структуры ландшафтов, а также их сохранение и рациональное природопользование. Основным решением возникающей проблемы может стать концепция экологического каркаса территории. [6,7,8,9,10 и др.]. Сформированный экологический каркас лессового массива может послужить источником базы данных для наблюдения за территорией.

**Экологический каркас** – четко структурированная система взаимосвязанных в процессе зонирования и развития природных и техногенно измененных территорий, имеющих разное назначение и правовой статус, способных обеспечить экологический баланс, социально-экономическую целостность и устойчивое развитие техногенно нарушенной (урбанизированной) территории как биосферосовместимого комплекса [10].

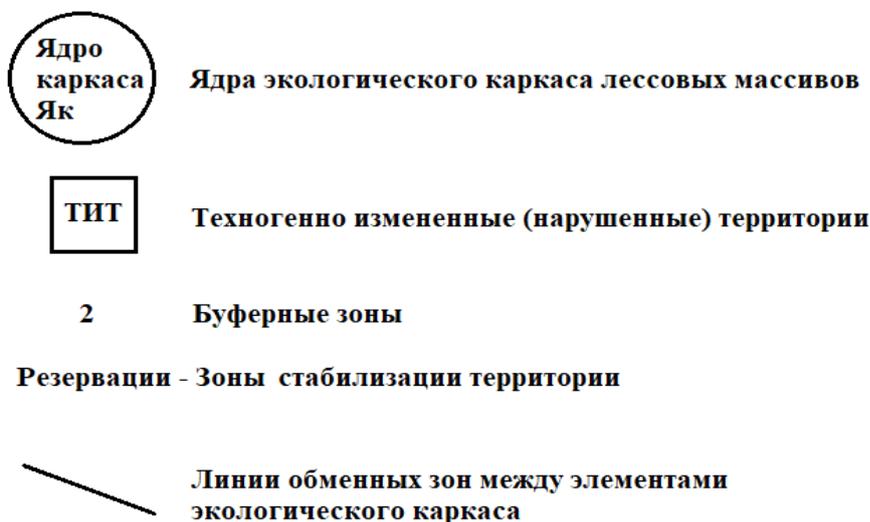
Экологический каркас, спроектированный с учетом влияния основных факторов ядер каркасов, буферных зон, экологических коридоров, зон стабилизации и техногенно измененных территорий, позволяет сбалансировать геоэкологические и техногенные показатели конкретной территории, что в свою очередь может помочь сохранить жизнеспособность территории.

В качестве ядра экологического каркаса выступают - особо охраняемые территории, которые в силу общей техногенной нагрузки не могут поддерживать геоэкологическое равновесие. Для решения такой задачи необходимо создание компенсационных систем состоящих из участков с различными режимами природопользования. Предлагаем рассмотреть следующий обобщенный методический подход формирования экологического каркаса для лессовых ландшафтов в особых физико-географических условиях [7, 10 и др.](Рис.1):

1. Выделение экологических ядер каркаса;
2. Выделение буферных зон;
3. Выделение зон стабилизации территории (резервации).
4. Выделение техногенно измененных территорий (урбанизированные территории, промышленные зоны, зоны водозаборов, складирования ТБО, очистные сооружения и др.);
5. Выделение экологических коридоров (или обменные зоны).



Условные обозначения



**Рис. 1.** Схематическое представление структуры экологического каркаса лесового массива, осложненного техногенно измененными территориями.

Кратко остановимся на выделенных структурных элементах экологического каркаса лесовых территорий.

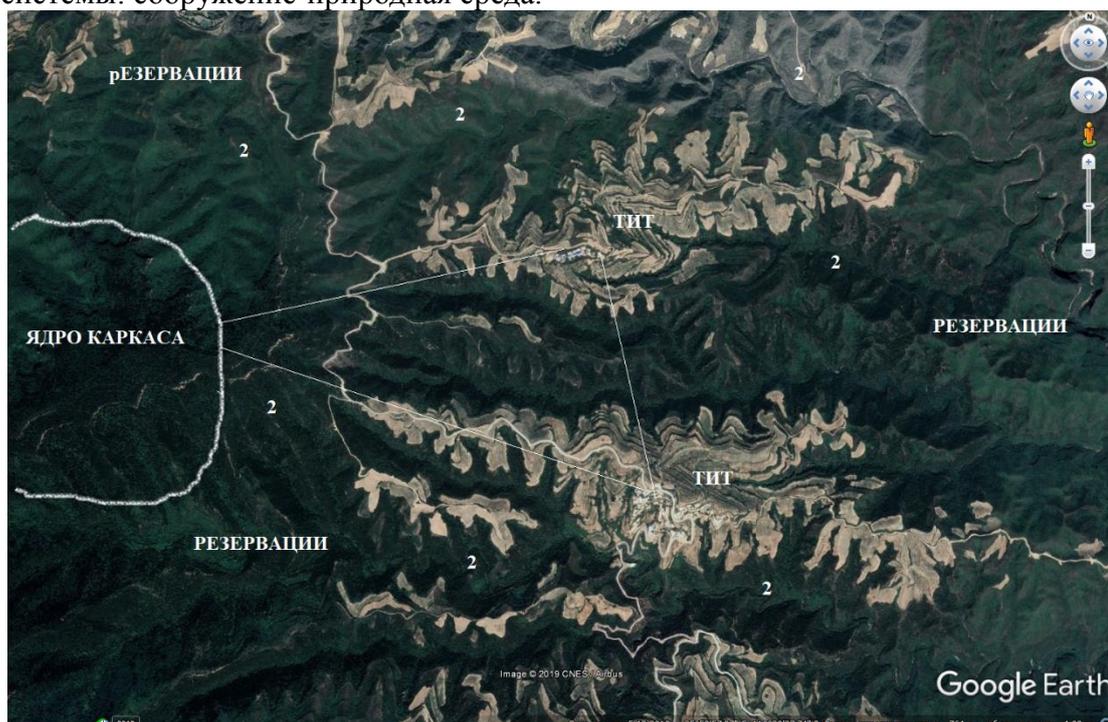
**Экологические ядра.** Основные элементы экологического каркаса обеспечивающие условия устойчивого функционирования биogeоценозов. В состав экологических ядер, как правило, входят природные ландшафты высокой природоохранной значимости ООПТ (заповедники, заказники, национальные парки и др.) представляющие характерные естественные экосистемы обеспечивающие поддержание популяционных фоновых, характерных, редких и хозяйственно значимых видов выполняющих средообразующую функцию. Оценка эффективности деятельности ядра должна быть организована на базе мониторинга природных процессов и явлений и их изменений под влиянием техногенной деятельности на единой научно-методической основе. [7]. (стр.14 Экологический каркас РТ)

В настоящее время не существует единого мнения о том, какую площадь должны занимать ядра в экологическом каркасе. По мнению ряда исследователей, методом экс-

пертных оценок, было показано, что общая площадь экологического каркаса должна составлять не менее 25% территории [5].

Подавляющее большинство экспертов считают, что для сохранения экологического баланса необходимо, чтобы доля ядер экологического каркаса от всей территории варьировала в диапазоне от 20 до 60 %, причем эта доля должна существенно увеличиваться с юга на север и от равнинных территорий к горным. [7]. (Там же на стр.714).

Защиту ядер экологического каркаса и техногенно измененных территорий от неблагоприятных воздействий осуществляют «буферные территории», к которым относятся санитарно-защитные зоны озер, рек, водохранилищ, промышленных предприятий, земель лесного фонда и др. Именно в этой зоне происходит формирование целого комплекса опасных геологических процессов, вызывающих нарушение условий всего жизненного цикла сооружения и комплексной устойчивости природно-техногенной экосистемы: сооружение-природная среда.



**Рис. 2.** Фрагмент природных условий к Рисунку 1 на примере территории экологического каркаса правобережного склона реки Хуанхэ (провинция Ганьсу, к северо-западу от знаменитых порогов реки Хуанхэ). Условные обозначения к рис.1.

**Буферные зоны.** Буферные зоны предназначены для смягчения негативного воздействия техногенеза на экологические ядра каркасов, зоны стабилизации территорий (резервации) и зоны экологических коридоров. Необходим комплекс архитектурно-планировочных, лесомелиоративных мероприятий по благоустройству и освоению буферных зон. Развитие опасных геологических процессов в буферных зонах может привести к деформациям, разрушению и выходу из строя подводящих коммуникаций, а при активно развивающихся геологических процессах, к разрушению и самого сооружения.

Знание причин и условий эксплуатации буферной зоны сооружений на лессовых массивах позволит предотвратить развитие опасных геологических процессов, а при их развитии, предусмотреть мероприятия по их локализации.

Таким образом, буферные зоны на лессовых массивах это лентообразные или кольцевые зоны различной ширины, которые окружают поселения, городские агломерации или ядра экологических каркасов, с определенной густотой растительности и нередко, уже проведенным комплексом некоторых гидромелиоративных мероприятий, изолирующие хрупкую окружающую среду от зон активного техногенеза. С другой

стороны, в буферных зонах должны быть минимизированы опасности геологических процессов разрушающих поселения и городские агломерации [11,12].

Нами рассматриваются четыре основных варианта расположения буферных зон (Рис.3):

1. Буферная зона находится на уступе верхней (плакорной) части склона. Она может быть различной ширины и как бы отделяет сооружение от крутого уступа.

2. Буферная зона отделяет сооружение от склона, сложенного лессовыми породами, то есть сооружение находится у подножья склона.

3. Буферная зона находится на склоне долины сложенной лессом. В этом случае мы рассматриваем два варианта буферных зон: на пологих и крутых склонах.

4. Буферная зона находится на горизонтальной поверхности, как правило, на дне долин. В этом случае мы рассматриваем также буферные зоны речных террас и пойм рек (аллювиальных равнин).

Каждый из выделенных вариантов буферных зон имеет четкие границы и относительно обособленную экосистему. Такой способ выделения экологических единиц (участков) дает возможность зонирования сельского и лесного хозяйства, позволяет исследовать последовательность и непрерывность изменения экосистемы лессовых массивов под влиянием деятельности технически вооруженного человека [11].

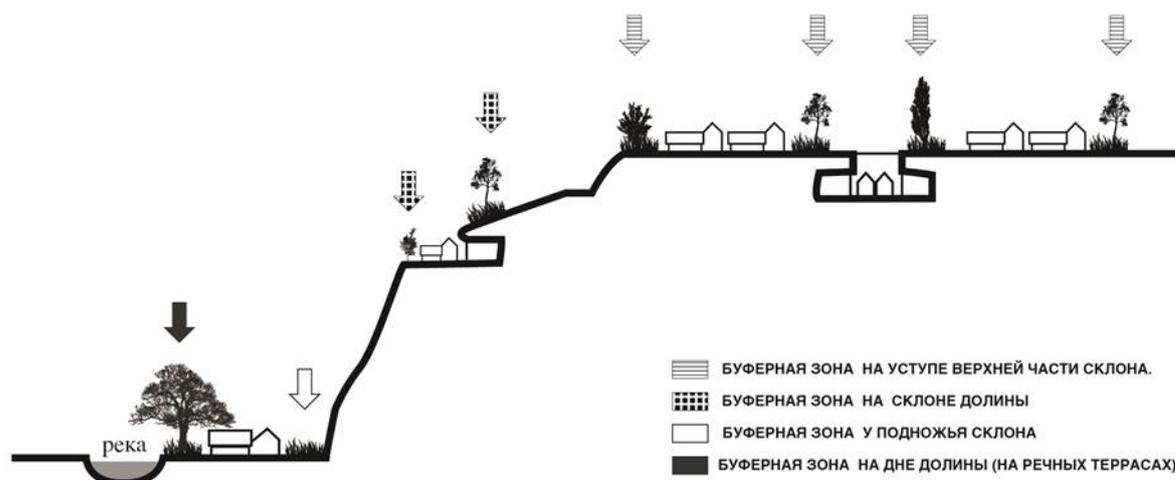


Рис. 3. Основные варианты расположения сооружений на лессовых массивах. Стрелками указаны места расположения буферных зон [11].

**Зоны стабилизации территории (резервации).** Выделяются как промежуточные, для восстановления экологической обстановки и поддержания экологического баланса территории. Это самые большие по площади территории, играющие большую роль в формировании экологически сбалансированной структурной организации территории района.

**Зоны техногенно измененных территорий (урбанизированные территории, включая зоны водозаборов, складирования ТБО, очистные сооружения, сельскохозяйственные угодья и др.).** Зоны активного техногенеза, которые, как правило, сопровождаются обширными прилегающими территориями занятыми сельхозугодьями, промышленными предприятиями, местами добычи полезных ископаемых, зонами складирования ТБО и др.

**Зоны экологических коридоров (или обменные зоны).** Это территории линейно вытянутые в пространстве и имеющие небольшую ширину. Основная функция этих зон транспортная, то есть это основные магистрали биогеохимического обмена веществом и энергией между элементами экологического каркаса. Это долины рек, овражно-

балочная сеть, гидромелиоративные сооружения (каналы, водохранилища и др.), автомобильные, железные дороги, мосты и др. Эти зоны должны иметь свой охранный режим, планируемую деятельность и быть экологически чистыми, так как через них в ядра экологических каркасов за кратчайшие сроки может поступить чрезмерное загрязнение, которое может вызвать дестабилизацию состояния всей экосистемы.

В местах, где экологический каркас имеет разрывы например, зоны активного развития лессового псевдокарста, должны создаваться искусственные элементы (например, посадки *Robinia pseudoacacia* L.) принадлежащей, к семейству Бобовых род Робиния, или можжевельника китайского (*Juniperus chinensis* L.) на склонах, где была снята естественная растительность, с целью воссоздания его единой структуры. [13].

### **Выводы**

1. Из-за особенностей геоэкологической среды лёссовых массивов с особым составом и свойствами, они, под воздействием техногенеза, чрезвычайно быстро разрушаются, с развитием таких опасных геологических процессов как лессовый псевдокарст, просадочность, эрозия и др. Восстановление нарушенных экосистем долгое и не всегда эффективное. Эти вопросы, с точки зрения инженерной геоэкологии, ограничивают выбор строительной площадки на лессовых массивах и повышают стоимость строительства. Поэтому выяснение основных факторов, имеющих влияние на геологическую среду, закономерности и характеристики формирования опасных геологических феноменов, создание системы и методов оценки строительной площадки на лессовых массивах является первоочередными задачами.

2. Проектирование буферных зон на лессовых массивах необходимо для регулирования биогеохимического обмена веществом и энергией экологического каркаса лессового массива. Буферные зоны уменьшают дисбаланс разрушаемой техногенезом экосистемы лессовых массивов, повышают ее средообразующую функцию и устойчивость к негативным внешним воздействиям.

### **Литература**

1. Цинь Минзау. Биотехнические меры для защиты окружающей среды по землепользованию в США- буферная зона//Охрана почвы и воды.2001.№1. Т.15. С.119-120.
2. Данилевич Д.В., Бондарева Е.Н. Построение экологического каркаса урбанизированной территории на примере Заводского района города Орла// Города, развивающие человека. № 1(5), 2014. С.75-83.
3. Павлова Е.В., Махрова М.Л., Ямских Г.Ю. ГИС-проект экологического каркаса территории Южно-Минусинской котловины как инструмент организации рационального природопользования и сохранения ландшафтов//Сибирский федеральный университет инженерии и технологии. 2015.(8). С.706-714.
4. Воскова А.В., Семина М.Е., Щёктова В.А. Особенности системы территориальной охраны природы в Москве и основные предпосылки ее развития в рамках концепции экологической сети // Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2014Т. XIII. С. 219 – 222
5. Щёктова В.А., Минин А.А., Воскова А.В., Семина М.Е. Использование ГИС-технологий при планировании экологической сети Московского региона//С.599-604.
6. Forman R.T.T., Gordon M. Landscape Ecology. N.Y., N.Y.USA: John Wiley and Sons, 1986.
7. Пономарев А.А., Байбаков Э.И., Рубцов В.А. Основы формирования экологического каркаса (на примере республики Татарстан)//Экологический консалтинг. -№3 (39).2010. С.12-17
8. Лопаткин Д.А. Картографическое отображение и анализ экологического каркаса региона (на примере бассейна оз. Байкал): диссертация канд. геогр. наук.: 25.00.36, 25.00.33 Иркутск, 2004. 160 с.

9. Стоящева Н.В. Экологический каркас территории и оптимизация природопользования на юге западной Сибири (на примере Алтайского региона): диссертация канд. геогр. наук.: 25.00.36 Барнаул, 2005. 213 с.
10. Данилевич Д.В., Бондарева Н.А. Построение экологического каркаса урбанизированной территории на примере Заводского района города Орла//Города, развивающие человека. № 1(5). 2014 (январь-март). С.75-83.
11. Лу Шенпин, Лаврусевич А.А. Проектирование буферных зон на лессовых массивах как основы ландшафтной экологии//Промышленное и гражданское строительство.2017. № 10. С. 18-21.
12. Евграфова И.М., Лаврусевич А.А. К вопросу обоснования корректирования размеров санитарно-защитной зоны. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014 № 6 С. 94-100.
13. Лаврусевич А.А., Крашенинников В.С., Лаврусевич И.А. Лессовый псевдокарст и опыт укрепления лессовых откосов искусственными посадками некоторых растений (на примере лессового плато в провинциях Ганьсу и Шеньси, Китай)//Инженерная геология. 2012. № 1. С. 48-59.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ТРЕЩИНОВАТОСТИ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ

Ходжибаев С.Д.

(НИУ МГСУ, г. Москва)

**Аннотация:** Измерение параметров трещин актуально для решения задач проектирования дорог, гидротехнических и других сооружений в районах развития с поверхности скальных и полускальных грунтов. Параметры трещин определяют устойчивость откосов, прочность на сдвиг, деформируемость, водопроницаемость скальных массивов. Предлагается использование электронных технических средств и компьютерных технологий для получения и обработки массовых определений трещиноватости скальных массивов.

**Ключевые слова:** скальный массив, устойчивость откосов, трещины, шероховатость, круговая диаграмма.

Физико-механические и фильтрационные свойства скальных и полускальных горных пород в массиве существенно зависят от характера трещиноватости.

Для оценки фильтрации наиболее важным параметром является ширина раскрытия трещин, в то время как при оценке устойчивости откосов ширина трещин играет меньшую роль, но весьма большое значение приобретает их ориентировка и шероховатость трещин.

При расчетах фильтрации осреднение ширины недопустимо, так как расход потока пропорционален кубу ширины трещины [1].

$$Q=f(b^3) \quad (1)$$

В задачах расчета деформаций также актуально знание ширины трещин, но там допустимо использование средней ширины трещин, поскольку модуль деформации [1] массива:

$$E=f(b^1) \quad (2)$$

Таким образом, для каждой инженерной задачи нужны своя модель трещиноватости, и это модель всегда многопараметрическая. Обобщенные показатели трещиноватости, такие как коэффициент трещиноватости и пустотности, модуль трещиноватости не пригодны для каких либо инженерных расчетов.

Для расчета устойчивости скального откоса в массиве с системной сетью трещин по методике С.Н. Чернышева необходимо знать следующие параметры сети трещин [1]:

$\alpha$  – азимут падения трещин;

$\beta$  – угол падения трещин;

$l$  – длина трещин;

$a$  – расстояние между трещинами;

$\varphi$  – угол трения по трещинам;

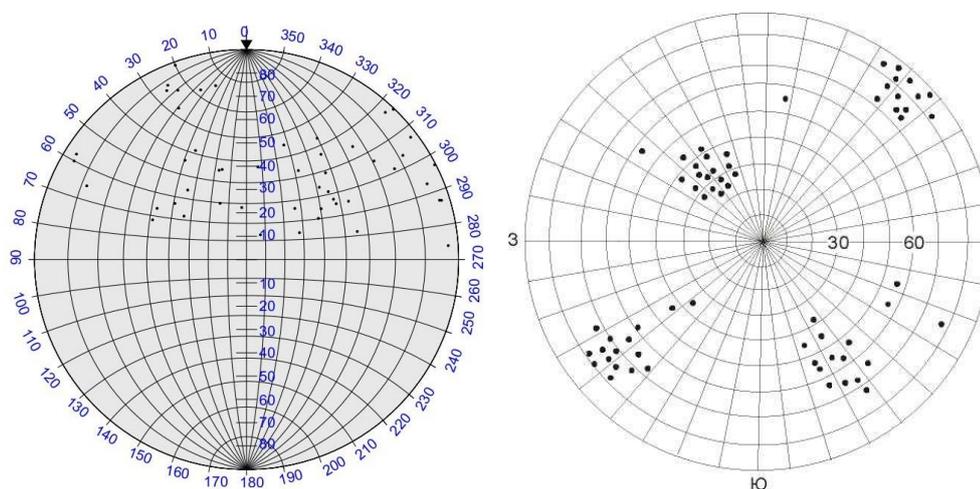
Характеристики могут быть взяты средними по системам трещин. Для получения характеристики  $\varphi$ , необходимо знать шероховатость поверхности трещины. Изучению шероховатости посвящены, в частности, работы С.Е. Могилевской [3]. Определены пределы изменения  $\varphi$  и  $c$ , для основных выделенных типов микрошероховатости (гладкого, шероховатого, грубошероховатого) С.Е. Могилевская получила уравнение зависимости  $\varphi$  (угла трения) от параметров шероховатости стенки трещины, а именно высоты выступа и угла наклона подъема на выступ по отношению к обобщенной поверхности плоскости трещины [3].

Для создания матрицы, характеризующей неоднородную систему трещин, необходимы массовые измерения параметров трещин на обнажениях и горных выработках. В

связи с этим возникает необходимость камеральной обработки массовых замеров и автоматизации замеров в полевых условиях.

Существующие программы позволяют легко обработать скалярные характеристики трещин, такие как: а- ширина, б-высота, л-длина.

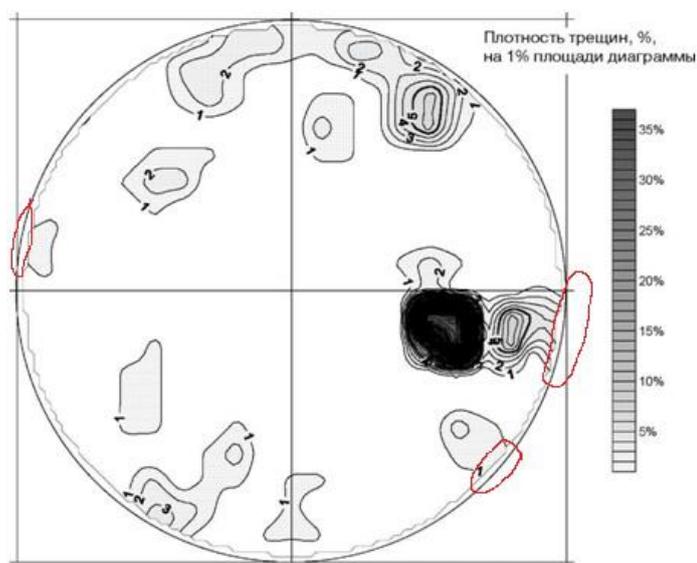
Направление падения характеризуется двумя величинами:  $\alpha$ -дирекционный угол и  $\beta$ -угол падения. Традиционно характеристика ориентации трещин дается на круговой диаграмме, построение которой представляет трудоемкую в ручном исполнении задачу. Попытки построить диаграмму с помощью ЭВМ пока не привели к окончательному решению (Рис. 1).



**Рис. 1.** Точечная круговая диаграмма трещиноватости.

В ходе нашего исследования разрабатывается программа, которая позволит получить точечную круговую диаграмму трещиноватости по численным значениям (рис1) [1].

В данный момент стоит задача подсчета плотности точек, для построения диаграммы в изолиниях. Основная проблема при построении изолиний интенсивности трещиноватости, заключается в том, что в некоторых местах образуются разрывы, которые показаны на рис. 2.



**Рис. 2.** Ошибки при построении изолиний интенсивности трещиноватости, полученной в программе Surfer [2].

Несомненно, работы по сбору характеристик трещин в полевых условиях зависят от количества человек в бригаде, сложности рельефа и т.д., а точность замеров не всегда оказывается высокой.

Сегодня на аппарат типа смартфон может быть установлена программа Geolocalcompass – она позволяет использовать прямоугольную форму телефона в качестве прямоугольного компаса, с длинной и короткой сторонами. Прикладывая их соответствующими сторонами к плоскости трещин, можно измерить азимут по длинной стороне устройства и угол падения трещины по короткой стороне. Измерения производятся с точностью до секунд в угловой мере, что намного превышает необходимую точность определения наклона реальной поверхности трещины в силу ее шероховатости. Автором настоящей статьи в 2018 году этим способом было проведено измерение ориентации несколько сотен трещин на обнажениях в Таджикистане. Измерения по данной методике проводились в Ромитском ущелье, Варзобе и Нуреке.

Программа «горный компас» фиксирует в памяти аппарата результаты измерений, что сокращает бригаду с двух до одного человека. В камеральных условиях результаты измерений выводятся на компьютер, в результате чего мы получаем точечную круговую диаграмму трещиноватости.

Другой задачей полевой работы является определение шероховатости поверхности трещины. Для получения параметра  $\varphi$  по формулам С.Е. Могилевской надо знать, амплитуду колебания поверхности и крутизну волны, что можно сделать путем сканирования поверхности трещины с помощью тахеометра Trimble S6 с последующей его обработкой в программе - 3D Reshaper или Survey Bundle.

С помощью Trimble S6 были просканированы поверхности стен и памятников архитектуры [4], но сканирование скальных массивов для построения модели трещин в трехмерном пространстве еще не проводилось.

Таким образом, разработана методика, которая позволяет резко сократить время на построение моделей трещиноватости и повысить их точность.

### Литература

1. Чернышев С.Н. Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. - М.: Недра, 1984. 111 с.
2. Кузьмин В.С., Копытин А.С. Применение компьютерных технологий для решения задач, связанных с изучением трещиноватости скальных массивов//Материалы научно-технической конференции: РУДН, серия №3, Москва, 2013, 83-92с.
3. Могилевская С.Е. Экспрес-Метод определения параметров сопротивления сдвигу.
4. Чернышев С.Н., Елманова Е.Л., Рубцов И.В. Исследование рельефа стены памятника архитектуры, как подобия рельефа территории//Материалы научно-технической конференции-Москва: МГСУ, 2018. №4. с.44-49
5. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. -Москва: Недра, 1970. — 164 с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение форума «Опасные для строительства геологические процессы» посвященном 70-летнему юбилею доктора геолого-минералогических наук, профессора Виктора Петровича Хоменко представитель Дзержинской школы исследователей карста, член Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, к.геол.-мин.н. М.В. Леоненко рассказал о состоявшемся в рамках 6 секции 20-го научно-промышленного международного форума «Великие реки – 2018» круглом столе по теме: «Вопросы карста в современной нормативно-строительной документации» (г. Нижний Новгород, 16 мая 2018г.).

Круглый стол был организован Нижегородским государственным архитектурно-строительным университетом (ННГАСУ) по инициативе члена комитета по инженерной геологии НОПРИЗ В.А. Маслова. Участвовали представители 4-х ведущих школ инженерного картоведения России. Состоялось обсуждение вопросов нормативной документации в части оценки опасности и риска карстового процесса, методов расчета возможных размеров провалов, а также применения вероятностных подходов к оценке карстоопасности, как наиболее адекватно учитывающих особенности развития и проявления карстового процесса. По результатам дискуссии участниками круглого стола было принято Решение, состоящее из констатирующей части и рекомендаций (Приложение 1).

Заслушав текст Решения, прочитанного М.В. Леоненко, участники международного семинара «Опасные для строительства геологические процессы» единодушно поддержали «Решение круглого стола на тему: Вопросы карста в современной нормативно-строительной документации».

**Решение участников круглого стола на тему:  
"Вопросы карста в современной нормативно-строительной документации",  
состоявшегося 16 мая 2018 года в г. Нижнем Новгороде в рамках 20-го научно-  
промышленного международного форума «Великие реки – 2018».**

**I. Участники круглого стола констатируют:**

1. За последние несколько десятилетий изучения карста не появилось ничего принципиально нового, что заставило бы коренным образом пересмотреть взгляды, как на природу карстового процесса и его оценку, так и на мероприятия, предотвращающие его опасные проявления в основании инженерных сооружений. В то же время, последние Федеральные законы (№190-ФЗ «Градостроительный Кодекс Российской Федерации» и №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (№384-ФЗ) выдвинули ряд новых требований к проектно-изыскательским работам.

2. Одно из основных требований, поставленных в 2009 году ФЗ-384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», заключается в обязательности оценки риска возникновения опасных природных процессов и явлений и его учете при строительном освоении территорий. В подзаконных актах, которыми являются нормативные документы (СП 22.13330.2016, СП 47.13330.2016, СП 116.13330.2012 и др.), это требование в разделах, связанных с развитием карста, к сожалению, не учтено.

Сводами Правил (кроме СП 58.13330.2012) до настоящего момента времени не установлены конкретные значения допускаемых (пороговых) рисков негативных событий (провалов) и аварий сооружений от них, которые следует учитывать при проектировании объектов, возводимых на территориях развития карстовых процессов. Более того не определен даже порядок их назначения.

3. В последнее время в нормативных документах, регламентирующих строительное освоение закарстованных территорий, появилось требование применения жёстких детерминистских схем и отказа от вероятностных методов оценки опасности и риска проявления карстовых процессов (например, п.6.12.12 СП 22.13330.2016). Это не соответствует как природе карстового процесса и его проявлениям в основании сооружений, так и специфике инженерно-строительных изысканий. Такой подход можно считать приемлемым лишь для решения весьма узкого круга задач инженерного карстоведения в простейших случаях и только с определёнными допущениями.

4. Практика освоения закарстованных территорий показывает, что на настоящий момент времени расчетно-теоретические методы определения возможных размеров провалов хотя и достигли определенного прогресса, но ещё далеки от совершенства. Верификация подобных расчетов на участках провалов, хорошо изученных в геологическом плане, часто показывает недостаточную для инженерной практики сходимость. Это обусловлено существенным упрощением расчетно-теоретических моделей относительно реальной среды развития карстовых провалов, осложненной множеством факторов геологического характера.

Учет только размеров гипотетических провалов без риска (вероятности) их образования в основании сооружений на практике ведет к необоснованному завышению затрат на противокарстовую защиту на слабозакарстованных территориях, и недостаточную надежность защиты на сильнозакарстованных территориях.

5. В большинстве случаев вероятностный подход при оценке карстоопасности позволяет наиболее адекватно учитывать особенности развития и проявления карстового процесса. Данный подход был сформирован в результате многолетнего эволюционного пути развития инженерного карстоведения и апробирован на тысячах объектов. Важно также отметить, что он в достаточной мере обеспечен методической литературой (Инструкциями, Руководствами, Рекомендациями), способствуя грамотным решениям инженеров практиков. Сложившаяся в настоящее время ситуация, ведет к откату инже-

нерной практики на позиции начала прошлого столетия, когда инженерное карстоведение только делало первые шаги.

6. Отказ от правового применения Территориальных строительных норм (ТСН), разработанных для субъектов РФ, чьи территории в наибольшей мере страдают от развития карстовых процессов, ведет к недоучету характерных особенностей региональных инженерно-геологических условий и, в конечном итоге, к снижению качества проектно-изыскательских работ, и способствует росту аварийных ситуаций.

7. Разработка (актуализация) нормативных документов федерального уровня узким кругом исполнителей, без привлечения ведущих специалистов в области инженерного карстоведения из различных (в первую очередь карстоопасных) регионов страны, а также без широкого обсуждения проектов новых нормативных документов на специализированных совещаниях и в открытой печати, приводит к снижению их качества, и как следствие, увеличивает риск аварийных ситуаций.

## **II. Участники круглого стола рекомендуют:**

1. Привести в соответствие с требованиями ФЗ-384 об обязательности оценки риска возникновения опасных природных процессов и явлений разделы и пункты Сводов Правил (СП 22.13330.2016, СП 47.13330.2016 и др.), связанные с карстовой проблемой.

До разработки, апробации и введения в нормативные документы значений допускаемых уровней риска аварий для сооружений, возводимых на закарстованных территориях (кроме объектов ядерной отрасли), при назначении противокарстовой защиты учитывать значения допускаемых уровней риска аварий не менее, чем уже закрепленных в СП для заведомо более ответственных сооружений (гидротехнических I класса – 5·10<sup>-5</sup> случаев в год в соответствии с таблицей 1 п.8.22 СП 58.13330.2012).

2. В нормативной документации недопустимы ограничения на применение любых научно обоснованных методов, в том числе вероятностных, расчетно-теоретических или лабораторно-экспериментальных. Любой предлагаемый в СП метод требует верификации, четкого представления условий его применения и обеспечения литературой методического характера. В связи с этим необходимо составить новую редакцию «инженерно-геологической части» подраздела 6.12 (п.п. 6.12.1 – 6.12.12) СП 22.13330.2016, ориентируясь на апробированные временем положения раздела 5 СП 11-105-97. Часть II.

3. На законодательном уровне необходимо вернуть в инженерную практику Территориальные строительные нормы (ТСН) на инженерные изыскания, проектирование и строительство на закарстованных территориях, как в наибольшей мере учитывающие региональные особенности геологического строения и характер проявления карстовых процессов.

4. При разработке и/или актуализации пунктов и разделов нормативных документов федерального уровня по строительству на закарстованных территориях следует привлекать ведущих специалистов в области инженерного карстоведения из различных регионов страны. Последние редакции документов выносить на широкое обсуждение и согласование в Научном совете РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии.

5. Довести решение круглого стола до Министра РФ, НОПРИЗа, Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Главгосэкспертизы России, а также других заинтересованных (профильных) организаций и местные органы власти, где остро стоит проблема карста.

6. Опубликовать решение данного круглого стола.