

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.131.1:551.3

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.8

Предотвращение негативных социальных и экологических последствий развития суффозионных процессов

Виктор Петрович Хоменко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предметом исследования является суффозия — опасный для строительства экзогенный геологический процесс, способный в своем крайнем проявлении вызвать катастрофу. Цель исследования — проанализировать взаимодействия природной и техногенной подсистем в природно-технических системах, возникающих при хозяйственном освоении территорий, благоприятных для развития суффозионных процессов.

Материалы и методы. С позиций системного подхода анализируется отечественный и зарубежный опыт эксплуатации объектов различного назначения, испытывающих негативное воздействие суффозионных процессов природного и техногенного происхождения. Особое внимание обращено на возможные катастрофические последствия таких воздействий для зданий и сооружений. Отмечается, что, несмотря на наличие определенных позитивных аспектов во взаимодействии суффозии с окружающей средой, негативные аспекты преобладают.

Результаты. Нейтрализация возможных нежелательных социальных и экологических последствий формирования различного рода подземных и поверхностных суффозионных проявлений достигается путем рационального выбора, четкого инженерно-геологического обоснования и грамотной реализации мероприятий, резко снижающих (а иногда и исключающих) возможность возникновения связанных с этим чрезвычайных ситуаций. Предложена классификация применяемых в настоящее время и вполне пригодных к применению в будущем способов защиты территорий, зданий и сооружений от негативных последствий развития суффозии, в том числе спровоцированного самим защищаемым объектом. Перечислены разные варианты защитных мер, относящиеся к каждому из выделенных типов противосуффозионных мероприятий.

Выводы. Отмечается, что при наличии на конкретной территории существующих суффозионных проявлений или в случае научно обоснованного предположения относительно потенциальной возможности развития суффозионных процессов необходима всесторонняя оценка природно-техногенной обстановки и ее ожидаемых изменений. Вслед за этим должно осуществляться планирование дальнейших действий либо по сохранению сформированных суффозией элементов ландшафта, либо по максимально возможному устранению любых угроз со стороны этого процесса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: суффозия, опасность, ущерб, окружающая среда, инженерная геодинамика, строительство, инженерная защита

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Хоменко В.П. Предотвращение негативных социальных и экологических последствий развития суффозионных процессов // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 4. Ст. 8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.8

Автор, ответственный за переписку: Виктор Петрович Хоменко, khomenko_geol@mail.ru.

Prevention of negative social and environmental consequences of suffosion

Victor P. Khomenko

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The subject of the study is suffusion — an exogenous geological process dangerous for construction, capable to cause a catastrophe. The term suffusion is interpreted most widely in comparison with other interpretations: according

it suffosion includes leaching, piping, subsurface erosion of soils or rocks, cemented by soluble material. The aim of the study is to analyze the interaction of natural and anthropogenic subsystems in natural-technical systems arising from the economic development of territories favourable for the development of suffosion processes.

Materials and methods. Domestic and foreign experience of exploitation of objects of various purposes experiencing negative impact of natural and anthropogenic suffosion processes is analyzed from the position of system approach. Special attention is paid to possible catastrophic consequences of such impacts for buildings and structures. It is noted that, despite the presence of certain positive aspects in the interaction of suffosion with the environment, negative aspects prevail.

Results. Neutralization of possible undesirable social and ecological consequences of formation of various kinds of underground and surface suffosion manifestations is achieved by rational choice, clear engineering-geological substantiation and competent implementation of measures that sharply reduce (and sometimes exclude) the possibility of related emergencies. Classification of currently used and quite suitable for application in the future methods of protection of territories, buildings and structures from negative consequences of suffosion development, including those provoked by the protected object itself, is proposed. Different variants of protective measures related to each of the identified types of anti-suffosion measures are mentioned.

Conclusions. It is noted that in the presence of existing suffosion occurrences on a particular territory or in case of a scientifically justified assumption regarding the potential possibility of development of suffosion processes, a comprehensive assessment of the natural-technogenic situation and its expected changes is necessary. This should be followed by planning of further actions, either to preserve the landscape elements formed by suffosion or to eliminate any threats from this process as much as possible.

KEYWORDS: suffosion, hazard, damage, environment, engineering geodynamics, construction, engineering protection

FOR CITATION: Khomenko V.P. Prevention of negative social and environmental consequences of suffosion. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(4):8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.8

Corresponding author: Victor P. Khomenko, khomenko_geol@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современной России термин «суффозия» понимают по-разному. Некоторые считают, что суффозия — это всего лишь свободная транспортировка фильтрационным потоком мелких частиц несвязных дисперсных пород между их крупными частицами [1]. Другие называют суффозией только механическое фильтрационное разрушение и подземное размывание дисперсных пород с последующим выносом разрушенного материала в некое свободное пространство [2]. Обе перечисленные точки зрения отвергают понятие «химическая суффозия». В последние десятилетия в нашей стране все большее распространение приобретает очень широкое толкование термина «суффозия», согласно которому этот процесс представляет собой разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и цементированных обломочных пород, в том числе слагающих структурные элементы скальных массивов [3]. Именно это определение понятия «суффозия» было включено в некоторые строительные нормы¹.

В Российской империи термин «суффозия» был введен в обиход в 1898 г. выдающимся геологом А.П. Павловым [4]. В его основу положено образное латинское слово «suffosio», которое переводится на русский язык как «подкапывание». В статье А.П. Павлова отсутствует определение термина «суффозия», но дано описание этого процесса, из которого следует, что термин понимается очень широко. К сожалению, впоследствии понятие «суффозия» было переосмыслено другими исследовате-

лями в сторону ограничения его объема. В то же время в 1898 г. в Британской империи имел место еще один знаменательный факт: была предотвращена катастрофа на плотине Нарора (Narora), построенной на реке Ганг, под флютбетом которой начиналось развитие суффозии (piping). Научные исследования Дж. Клибборна (J. Clibborn) и практические шаги, осуществленные Дж. Бересфордом (J.S. Beresford), позволили в последний момент предсказать разрушение этого гидротехнического сооружения и избежать человеческих жертв [5]. Восстановление плотины сопровождалось применением противосуффозионных защитных мероприятий.

В то же время наибольший социальный и экологический ущерб, когда-либо нанесенный суффозией, также имеет прямое отношение к гидротехническому строительству [6]. Катастрофа, повлекшая за собой гибель 11 человек, произошла в 1976 г. в США (штат Айдахо) и была связана с разрушением плотины Титон (Teton). Когда водохранилище стали заполнять в первый раз, началось размывание (internal erosion) ядра плотины, сложенного лессовыми породами, в зоне их контакта со скальным основанием. Экономический ущерб был оценен почти в полмиллиона долларов.

Однако суффозия (если понимать этот термин широко) способна наносить ущерб не только объектам гидротехнического, но и других видов строительства, а также окружающей среде, причем интенсивность подобного рода инцидентов в последнее время явно возрастает. Ощутимые негативные социальные и экологические последствия развития суффозии как природного, так и техногенного происхождения наблюдаются в России [7] и в других странах, причем расположенных на разных континентах, например в Израиле [8], Иране [9], Ниге-

¹ СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.



Рис. 1. Здание и проезжая часть улицы, разрушенные суффозионным провалом, образовавшимся в результате фильтрационного разрушения водонасыщенных песков и их выноса в строящийся тоннель (г. Москва, 1998 г.). Фото В.П. Хоменко

рии [10], Польше и Испании [11], США [12]. Разумеется, это требует применения определенных мер, предупреждающих и даже исключаящих развитие суффозионных процессов, однако представления о таких мерах и об их необходимом обосновании нигде в мире не систематизированы. В нашей стране в нормативных документах до сих пор отсутствует понятие «противосуффозионная защита», хотя применительно к другим опасным для строительства геологическим процессам аналогичные словосочетания применяются.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование суффозионных процессов осуществлялось автором данной статьи, начиная с 1975 г., и продолжается до настоящего времени, причем наибольший социальный ущерб, нанесенный суффозией и не связанный с гидротехническим строительством, наблюдался им в конце прошлого века (рис. 1). Широкое понимание термина «суффозия» вызывает необходимость классифицирования этого опасного для строительства геологического процесса, в первую очередь так, как показано на рис. 2. Это, в частности, требуется для конкретизации понятия «суффозионно-неустойчивые горные породы (грунты)» (табл. 1), которое раньше распространялось исключительно на невязные дисперсные породы с бутовой текстурой. Назрела также необходимость четкого представления о том, в каких условиях может осуществляться суффозионный вынос и транзит (табл. 2). При этом необходимо отметить, что в английском языке термину «химическая суффозия» соответствует термин «leaching» [13], а термину «механическая суффозия» с некоторыми оговорками соответствует термин «soil piping» [14]. Кроме того, в разных странах мира присклоновая механическая суффозия часто именуется словосочетаниями «internal erosion», «subsurface erosion» и «tunnel erosion».

Развитие суффозии приводит к формированию подземных и поверхностных суффозионных проявлений. Первые представляют собой структурные элементы массива горных пород. Это могут быть

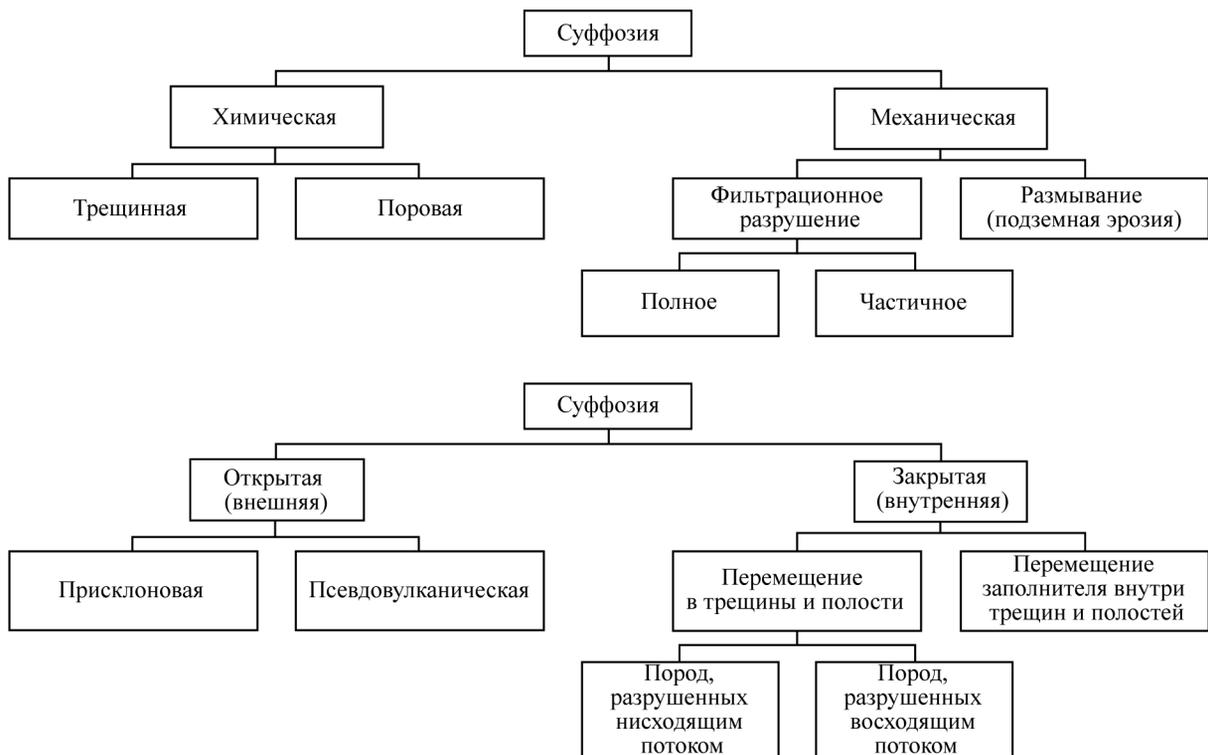


Рис. 2. Классификации суффозии, предложенные В.П. Хоменко [3]: по характеру разрушения горных пород (вверху) и по условиям выноса и перемещения разрушенных пород (внизу)

Табл. 1. Суффозионно неустойчивые горные породы

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

некоторые области диспергированных скальных пород и разуплотненных дисперсных пород (с четкими или размытыми границами), псевдоплыунные тела, а также полости различной конфигурации. К поверхностным суффозионным проявлениям относятся псевдовулканы (чаще всего представляющие собой так называемые песчаные вулканы), ниши (иногда достигающие размеров пещер) с аккумулятивными «шлейфами», оползни, провалы, оседания и водопоглощающие поноры. Все эти формы рельефа, за редким исключением, формируются не только и не столько за счет суффозии, но и за счет других геологических процессов, к которым относятся гравитационные склоновые процессы, а также обрушение, истечение, прогиб и уплотнение дисперсных пород. Поверхностные суффозионные проявления могут формироваться не только на земной поверхности, но и под подошвами фундаментов различных строительных объектов.

Согласно Дж. Хатчинсону [15], первая научная публикация, содержащая подробное описание суффозионных проявлений, сформировавшихся в результате присклонового фильтрационного разрушения дисперсных пород (seepage erosion) на территории Великобритании (графство Кент), появилась в конце XVIII в. В наше время во всем

мире сельские жители обычно хорошо осведомлены о присутствии на доступных им территориях поверхностных суффозионных проявлений, но в городах о них быстро забывают, поскольку местные власти стараются их как можно быстрее ликвидировать. В принципе, суффозионные проявления должны во всей возможной полноте обнаруживаться в ходе инженерно-геодезических и инженерно-геологических изысканий, причем для поиска подземных проявлений суффозии необходимо использовать буровые работы, статическое или динамическое зондирование и геофизические методы. До сих пор серьезной проблемой остается генетическая идентификация суффозионных проявлений, которая требует углубленного анализа инженерно-геологической обстановки.

На территории нашей страны условия, необходимые для развития суффозии, распространены очень широко, о чем свидетельствует составленная И.Г. Спиридоновым, В.П. Хоменко и С.В. Егоркиным карта, включенная в СП 115.13330.2016². Иногда суффозионные процессы природного происхождения, приуроченные к незастроенным и малоосвоенным терри-

² СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий.

Табл. 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
		Разгрузка подземных вод в виде восходящего источника	Псевдовулканическая
Любой	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

ториям, могут сформировать геологические объекты, имеющие эстетическую, научно-познавательную и рекреационную ценность (например, пещеры или озера, возникшие на месте провалов). Однако, несмотря на это, при взаимодействии суффозии со сферой человеческой жизнедеятельности явно доминируют негативные последствия. В результате суффозионного разрушения горных пород ухудшаются их прочностные и деформационные характеристики, а также увеличивается их водопроницаемость. Когда испытывавшие суффозионное разрушение породы находятся в зоне взаимодействия с каким-либо инженерным сооружением, это может привести к его деформированию. Намного хуже, если оседание, провал или оползень, вызванные развитием суффозии, внезапно войдут в соприкосновение со строительными конструкциями, не защищенными от такого рода эксцессов. Крайне нежелательны также потери воды из искусственных водотоков и водоемов, связанные с суффозионным разуплотнением дисперсных пород, а также с суффозионным выносом заполнителя трещин и полостей. По оценке А.Л. Рагозина [16], к концу прошлого века на территории России ущерб от развития суффозионных процессов наблюдался в 958 городах, и в настоящее время положение явно не изменилось к лучшему.

Анализ экономического ущерба, наносимого суффозией хозяйственным объектам различного назначения, показал, что в рамках конкретных природно-технических (литотехнических) систем наблюдаются специфические формы взаимодействий между суффозионным процессом и объектом. При этом можно столкнуться с четырьмя ситуациями. В первой наблюдается практически одностороннее воздействие на объект суффозионного процесса, имеющего природное происхождение. Вторая ситуация представляет собой взаимное воздействие друг на друга объекта и суффозионного процесса техногенного происхождения, который представляет собой результат функционирования этого объекта.

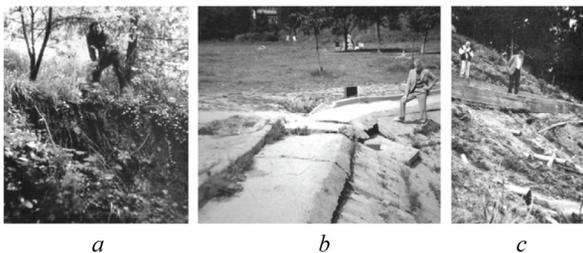


Рис. 3. Примеры активизации суффозии, инициированной мероприятиями по защите от других опасных геологических процессов (фото В.П. Хоменко): *a* — провал, вызванный суффозионным выносом грунта в противооползневую дренажную штольню (г. Сочи, 1988 г.); *b* — суффозионный вынос грунта из-под бетонных плит защитного покрытия берега пруда, сопровождающийся его разрушением (г. Москва, 1992 г.); *c* — присклоновая суффозия, обусловленная низким качеством противооползневой защиты (г. Истра Московской области, 1996 г.)

Третья ситуация похожа на вторую, но с той разницей, что техногенная суффозия является результатом функционирования другого объекта. Наконец, четвертая характеризуется таким воздействием объекта на суффозию, которое не приводит к негативным последствиям ни для него самого, ни для какого-либо другого объекта. Первая ситуация наиболее легко прогнозируется, третья прогнозируется наиболее тяжело, а к четвертой ситуации необходимо стремиться при строительном освоении территорий.

Суффозия способна оказывать негативные воздействия и на окружающую среду. Считается, что последствия таких воздействий не достигают уровня экологического бедствия [17], но вполне могут генерировать чрезвычайные экологические ситуации. Возникающий при этом ущерб связан с обезображиванием ландшафтов, загрязнением подземных и поверхностных вод продуктами суффозионного выноса, уходом воды из естественных и искусственных водотоков и водоемов, фатальными последствиями для биоценозов (в том числе в сельскохозяйственной сфере), со стихийным заполнением бытовым мусором отрицательных форм суффозионного рельефа.

Изучение причин развития суффозионных процессов в некоторых регионах Российской Федерации позволило выявить целый ряд негативных фактов, указывающих на то, что суффозия часто генерируется небрежным исполнением защитных мер, направленных на борьбу с другими опасными для строительства геологическими процессами. Это крайне неблагоприятно сказывается на эксплуатации различных хозяйственных объектов вплоть до возникновения аварийных ситуаций. Наиболее широко распространены подобного рода эксцессы, связанные с противооползневым дренажом (рис. 3, *a*) и с защитой от эрозионного и абразионного разрушения берегов естественных и искусственных водоемов (рис. 3, *b*). Встречаются и другие ситуации. Например, защита от оползня, образовавшегося на склоне холма, на котором расположен Воскресенский Новоиерусалимский монастырь, была выполнена в виде сложной жесткой конструкции, дополненной трубчатым дренажом. Она состоит из двух опирающихся на сваи железобетонных элементов (верхней подпорной стены и нижнего полосового упора), соединенных перекрывающими склон металлическими фермами. Через несколько месяцев после ввода в действие этого сооружения в зонах контакта полосового упора и дренажных труб с дисперсными породами, слагающими склон, начала активно развиваться подземная эрозия (рис. 3, *c*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Снизить уровень, а иногда и избежать негативных социальных и экологических последствий, связанных с развитием суффозионных процессов, можно за счет применения специальных мер защиты территорий, зданий и сооружений. Противосуффозионная за-

щита, несмотря на крайне редкое употребление этого словосочетания, существует как факт и имеет в нашей стране богатую историю [18]. Для защиты от суффозионных процессов и последствий формирования поверхностных суффозионных проявлений используются разные приемы, иногда направленные на борьбу исключительно с суффозией, а иногда хорошо известные как меры, противодействующие разрушениям, вызываемым другими экзогенными геологическими процессами. Для решения задач противосуффозионной защиты могут использоваться и средства (в основном провоцирующего характера [3]), на первый взгляд для этого не предназначенные.

Всесторонне рассматривая упомянутые выше технические приемы, автор статьи пришел к выводу о целесообразности их систематизации по ряду увязанных между собой качественных признаков выделения разных типов противосуффозионной защиты, которые в отдельных случаях могут быть взаимоисключающими. В качестве таких признаков были выбраны:

- степень вмешательства защитного мероприятия в механизм суффозионного процесса;
- время осуществления защитного мероприятия по отношению к временным рамкам развития суффозионного процесса и строительства защищаемого объекта;
- технологические особенности применения защитных мероприятий.

В результате была создана классификация, представленная в виде табл. 3. Она требует некоторых пояснений. Во-первых, принципиальное отличие пассивных противосуффозионных мероприятий от активных заключается в том, что вторые оказывают прямое воздействие на ход суффозионного процесса, а первые нет. Во-вторых, профилактический характер защиты отличается от оперативного тем, что он подразумевает ее осуществление до начала строительства или эксплуатации защищаемого

объекта (или до начала суффозионного процесса), а не в «пожарном» порядке. Кроме того, в табл. 3 присутствуют сведения, какого рода дополнительная информация (разумеется, помимо получаемой в ходе стандартных инженерно-геологических изысканий) требуется для обоснования выделенных типов противосуффозионной защиты. Ниже дается краткая характеристика каждого из них.

К пассивной противосуффозионной защите (рис. 4) относятся архитектурно-планировочные, конструктивные и контролирующие мероприятия, основные принципы реализации которых применимы при защите от любых других опасных для строительства геологических процессов. Архитектурно-планировочные мероприятия реализуют эскапистский принцип максимального недопущения попадания проектируемых площадных (рис. 4, а) и линейных сооружений в прогнозируемые опасные зоны или выбор своеобразной конфигурации зданий в плане, позволяющей «обтекать» опасные участки. Цель конструктивной защиты заключается в применении такой конструкции строительных объектов или дополнении ее такими элементами, которые не позволят защищаемому объекту деформироваться в случае резких подвижек грунтов, залегающих в его основании. Проектирование такой защиты осуществляется, конечно, с учетом размеров ожидаемых подвижек, например диаметра провала грунта (рис. 4, б). В состав контролирующих мероприятий входят стационарные наблюдения за уровнями и химическим составом подземных вод (рис. 4, с) и за рельефом земной поверхности на участке расположения защищаемого объекта, за подвижками взаимодействующих с ним грунтов, а также за состоянием самого объекта.

Активная противосуффозионная защита (рис. 5) объединяет мероприятия, которые могут провоцировать и предупреждать развитие суффозии и процессов, формирующих поверхностные суффозионные

Табл. 3. Классификация противосуффозионных мероприятий

Типы защитных мероприятий		Характер защиты	Необходимое обоснование (кроме результатов инженерно-геологических изысканий)
Пассивные	Архитектурно-планировочные	Только профилактический	Районирование территории по степени суффозионной опасности
	Конструктивные	Профилактический и оперативный	Прогноз размеров ожидаемых поверхностных суффозионных проявлений
	Контролирующие		Концептуальная модель развития суффозии
Активные	Провоцирующие	Только профилактический	Идентификация суффозионно неустойчивых горных пород
	Предупреждающие		
	Управляющие	Только оперативный	Определение критериев возникновения и развития суффозии
	Препятствующие	Профилактический и оперативный	Оценка возможности негативных побочных эффектов

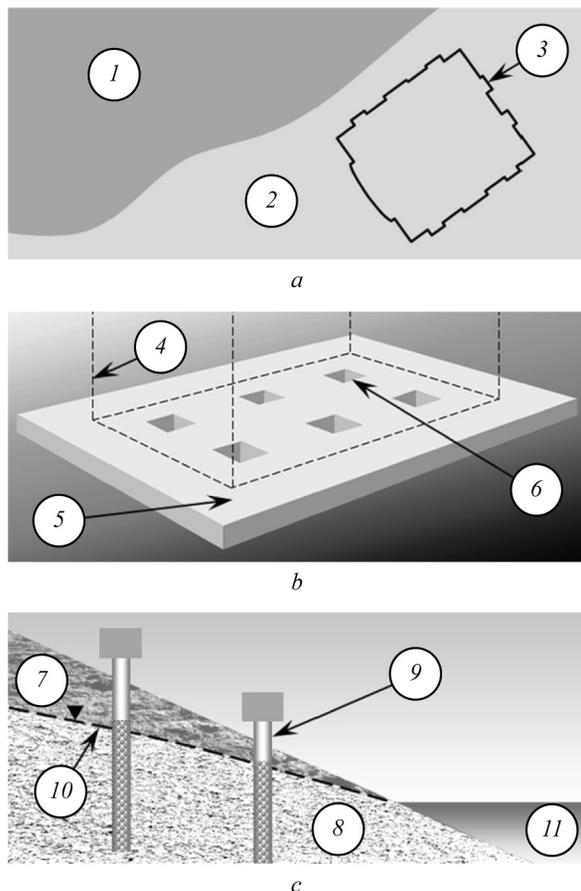


Рис. 4. Схемы, иллюстрирующие принципы осуществления пассивных противосуффзионных мероприятий: *a* — архитектурно-планировочных (на примере оптимального расположения здания); *b* — конструктивных (на примере монолитного железобетонного фундамента); *c* — контролирующих (на примере наблюдений за режимом подземных вод); 1 — участок, опасный с точки зрения возможности развития суффозии; 2 — участок, безопасный с точки зрения возможности развития суффозии; 3 — контур здания в плане; 4 — контур здания в перспективе; 5 — консольные выпуски; 6 — сквозное отверстие, предназначенное для оперативного заполнения провала; 7 — суффозионно устойчивые и (или) суффозионно неустойчивые горные породы; 8 — суффозионно неустойчивые горные породы; 9 — наблюдательная скважина, оснащенная необходимым оборудованием; 10 — уровень грунтовых вод; 11 — водоем

проявления, а также управлять такими процессами и препятствовать их развитию, откуда и вытекают названия этих защитных мер. Провоцирующие противосуффзионные мероприятия применяются крайне редко в связи со сложностью уверенного прогнозирования их конечного исхода. Они сводятся к интенсивному обводнению неводонасыщенных грунтов, к искусственному увеличению скорости фильтрации в водонасыщенных грунтах и к динамическим или ударным (вплоть до взрывных) воздействиям на грунты (рис. 5, *a*). Все это продолжается до тех пор, пока на земной поверхности не возникнет

оседание, провал или оползень. Мероприятия, предупреждающие (и, собственно говоря, исключаящие) появление и развитие суффозионных процессов и процессов, формирующих суффозионные проявления, в большинстве случаев представляют собой не что иное, как выполнение предписаний действующих строительных норм при наличии определенных геологических рисков. Любопытно, что в этих предписаниях не всегда используется термин «суффозия» и производные от него. Самым ярким примером таких решений служит изъятие суффозионно неустойчивых горных пород из сферы их взаимодействия с защищаемым объектом (рис. 5, *b*).

Управление суффозионными процессами предполагает искусственное снижение скорости подземного потока и растворяющей способности фильтрующей воды. Чаще всего это достигается осушением горных пород (см. рис. 5, *c*), однако в определенных условиях тот же результат можно получить и путем их обводнения, сопровождающегося при необходимости изменением химического состава воды. В перечень препятствующих мероприятий противосуффозионной защиты входят:

- создание барьеров на пути инфильтрации воды в суффозионно неустойчивые горные породы и ее фильтрации в таких породах;
- недопущение накопления атмосферных осадков на земной поверхности;
- каптаж и рассредоточение выходов подземных вод на земную поверхность;
- заполнение (тампонаж) полостей и трещин;
- техническая мелиорация суффозионно-неустойчивых (см. рис. 5, *d*) и вышележащих грунтов.

Необходимо отметить, что осуществление мероприятий, управляющих суффозией и препятствующих ей, требует серьезного обоснования, так как эти мероприятия могут вызвать активизацию других опасных для строительства геологических процессов вблизи защищаемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Решение проблем, связанных с предупреждением, минимизацией и ликвидацией негативных социальных и экологических последствий развития суффозионных процессов на городских территориях требуют особого подхода, который очень трудно формализовать³. Разработка четких алгоритмов действий в таких условиях является делом будущего, поскольку здесь приходится сталкиваться с неожиданными и парадоксальными ситуациями [19]. Значительно проще обстоит дело с решением подобного рода проблем при хозяйственном освоении

³ Димухаметов Д.М., Новопоселенских Л.А., Бахарева Н.С. Суффозионные процессы на территориях городов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. Ч. 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22188>

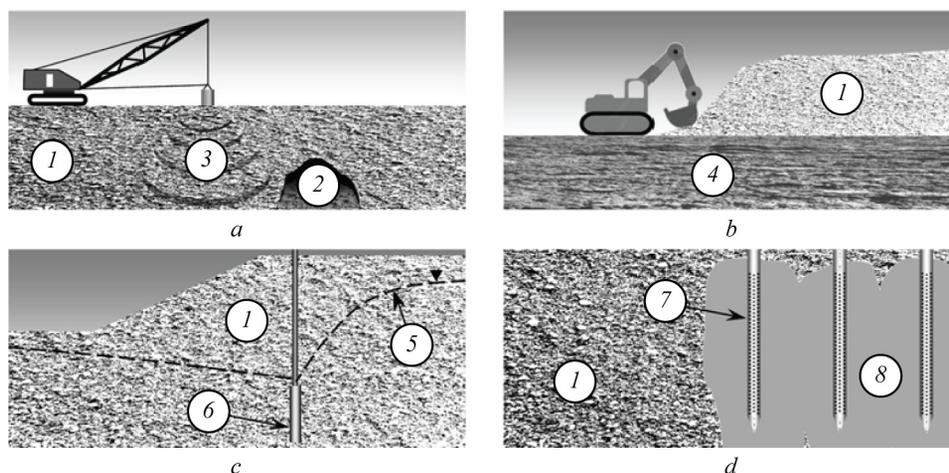


Рис. 5. Схемы, иллюстрирующие принципы осуществления активных противосуффозионных мероприятий: *a* — провоцирующих (на примере динамических воздействий на грунты); *b* — предупреждающих (на примере удаления суффозионно неустойчивых грунтов); *c* — управляющих (на примере вертикального дренажа); *d* — препятствующих (на примере закрепления грунтов): 1 — суффозионно неустойчивые горные породы; 2 — суффозионная полость; 3 — ударные волны; 4 — суффозионно устойчивые и (или) суффозионно неустойчивые горные породы; 5 — уровень грунтовых вод; 6 — иглофильтр; 7 — иньектор; 8 — закрепленный грунт

незастроенных территорий. В этом случае целесообразно действовать следующим образом.

На первом этапе после ознакомления с почерпнутой из разных источников информацией, а возможно, и в результате некоторого рекогносцировочного обследования местности, следует сделать вывод о присутствии на осваиваемой территории суффозионных проявлений. Здесь наибольшую сложность представляет их генетическая идентификация, уверенно подтвердить которую можно будет только на следующем этапе. Основным итогом первого этапа должен стать вывод о целесообразности сохранения, а возможно, и обустройства каких-либо суффозионных проявлений в качестве ценных природных объектов, либо их полной ликвидации при планировке территории. Для этого могут понадобиться инженерно-экологические изыскания.

Второй этап подразумевает осуществление инженерно-геологических изысканий и разработку на основе их результатов концептуальной модели развития суффозии, протекающего в рамках создаваемой природно-технической (литотехнической) системы. На этом этапе осуществляется рациональный научно-обоснованный выбор мероприятий противосуффозионной защиты, после чего могут понадобиться дополнительные исследования (рай-

онирование осваиваемой территории по степени суффозионной опасности, прогноз формирования суффозионных проявлений, идентификация и изучение состава и свойств суффозионно неустойчивых грунтов и др.). В конечном счете, должны быть даны четкие рекомендации по применению противосуффозионных защитных мероприятий до хозяйственного освоения территории, в ходе строительства и в ходе эксплуатации проектируемых объектов с учетом реальной необходимости. Очевидно, это потребует определенных экономических оценок.

Содержанием третьего (завершающего) этапа должны явиться:

- строительство проектируемых хозяйственных объектов, предваряемое или сопровождаемое осуществлением выбранных мер противосуффозионной защиты;
- мониторинг состояния этих хозяйственных объектов и окружающей среды;
- корректировка принятых инженерных решений, если возникнет такая необходимость.

В этом случае будут минимизированы или даже исключены предполагаемые негативные последствия развития суффозии, а возможно, и достигнуты определенные позитивные результаты в области ландшафтного дизайна.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Истомина В.С.* Фильтрационная устойчивость грунтов. М. : Госстройиздат, 1957. 295 с.
2. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л. : Недра, 1977. 479 с.
3. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М. : ГЕОС, 2003. 216 с.

4. *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.
5. *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. Pp. 1–26.

6. 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. Pp. 731–745.

7. Суздалева А.Л., Слесарев М.Ю., Яковлева И.Ю. Опасные геологические процессы на участках объектов незавершенного строительства // Вестник МГСУ. 2003. Т. 18. Вып. 10. С. 1599–1607. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1599-1607

8. Nahlieli A., Svoray T., Argaman E. Piping formation and distribution in the semi-arid Northern Negev environment: A new conceptual model // Catena. 2022. Vol. 213. Article No 106201. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106201

9. Kariminejad N., Sepehr A., Poesen J., Has-sanli A. Combining UAV remote sensing and pedological analyses to better understand soil piping erosion // Geoderma. 2023. Vol. 429. Article No 116267. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116267

10. Chibuogwu I.U., Ugwu G.Z. Exploring tunnel erosion susceptibility in Southern Nigeria, using direct current geophysical techniques // African Journal of Environment and Natural Science Research. 2023. Vol. 6. Issue 3. Pp. 67–87. DOI: 10.52589/AJENSR-DDBGL2HW

11. Bernatek-Jakiel A., Nadal-Romero E. Can soil piping impact environment and society? Identifying new research gaps // Earth Surface Processes and Landforms. 2022. Vol. 48. Issue 1. Pp. 72–86. DOI: 10.1002/esp.5431

12. Dastpak P., Sousa R.L., Dias D. Soil erosion due to defective pipes: a hidden hazard beneath our feet // Sustainability. 2023. Vol. 15. Article No. 8931. DOI: 10.3390/su15118931

13. Kurniawan A., Mc. Kenzie J., Putri J.A. General dictionary of geology. Yogyakarta : Department of Environmental Geography. Gadjah Mada University, 2009. 60 p.

14. Encyclopedia of Geomorphology. Vol. 1 and 2. Edited by A.S. Goudie. London : Routledge Taylor & Francis Group, 2004. 1201 p.

15. Hutchinson J.N. Damage to slopes produced by seepage erosion in sands // Landslides and mudflows: Reports of Alma Ata International Seminar, October 1981. M. : Centre of International Projects, GKNT, 1982. Pp. 250–265.

16. Рагозин А.Л. Концепция допустимого риска и строительное освоение территорий развития опасных природных и техноприродных процессов // Проект. 1993. № 5–6. С. 250–253.

17. Трофимов В.Т., Красилова Н.С. Геодинамические критерии оценки состояния эколого-геологических условий // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2000. № 3. С. 257–263.

18. Хоменко В.П. Противокарстовая и противосуффозионная защита в России: история и современность // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 4 (115). С. 231–238.

19. Кашиперюк П.И., Москалев Д.С., Хоменко В.П. Водопонижение как ведущий фактор развития суффозии при строительстве фундаментов глубокого заложения // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2023. № 4. С. 18–28. DOI: 10.31857/S0869780923030049

Поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 3 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 4 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Виктор Петрович Хоменко** — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии, старший научный сотрудник; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; khomenko_geol@mail.ru.

INTRODUCTION

In modern Russia the term “suffosion” is understood in different ways. Some believe that suffosion is just a free transport of small particles of unbound dispersed rocks between their larger particles by filtration flow [1]. Others call suffosion only the hydraulic failures and underground erosion of soils with the subsequent removal of the broken material into some free

space [2]. Both listed points of view reject the concept of “chemical suffosion”. In recent decades, a very broad interpretation of the term “suffosion” has become more and more widespread in our country, according to which this process is the destruction and removal by groundwater flow of individual components and large masses of soils and cemented clastic rocks, including those composing the structural elements of rock masses [3]. It is this definition of the concept of “suffosion”

that was included in some construction standards, for example¹.

In the Russian Empire, the term “suffosion” was introduced in 1898 by the outstanding geologist A.P. Pavlov [4]. It is based on the figurative Latin word “suffosio”, which translates into Russian as “undermining”. The article by A.P. Pavlov does not contain a definition of the term “suffosio”, but it gives a description of this process, from which it follows that the term is understood very broadly. Unfortunately, later the concept of “suffosion” was reinterpreted by other researchers in the direction of limiting its scope. At the same time, in 1898 in the British Empire another significant fact took place: the disaster at the Narora dam, built on the Ganges River, under the flutbet of which the development of suffosion (piping) started. Scientific researches of J. Clibborn and practical steps implemented by J.S. Beresford made it possible to predict the destruction of this hydraulic structure at the last moment and avoid human casualties [5]. The restoration of the dam was accompanied by the application of antisuffosion protective measures.

At the same time, the greatest social and environmental damage ever caused by suffosion is also directly related to hydraulic engineering [6]. The catastrophe that caused 11 deaths occurred in 1976 in the USA (Idaho) and was associated with the failure of the Teton dam.

¹ CP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic provisions.



Fig. 1. A building and a street carriageway destroyed by a suffosion collapse sink formed as a result of hydraulic failure of water-saturated sands and their removal into a tunnel under construction (Moscow, 1998). Photo by V.P. Khomenko

When the reservoir began to be filled for the first time, internal erosion of the dam core, composed of loess rocks, began in the zone of their contact with the rock base. The economic damage was estimated at almost half a million dollars.

However, suffosion (if this term is understood broadly) can cause damage not only to the objects of hydraulic engineering, but also to other types of construction, as well as to the environment, and the intensity of such incidents is clearly increasing recently. Tangible negative social and environmental consequences of the development of suffosion of both natural and man-made origin are observed in Russia [7] and in other

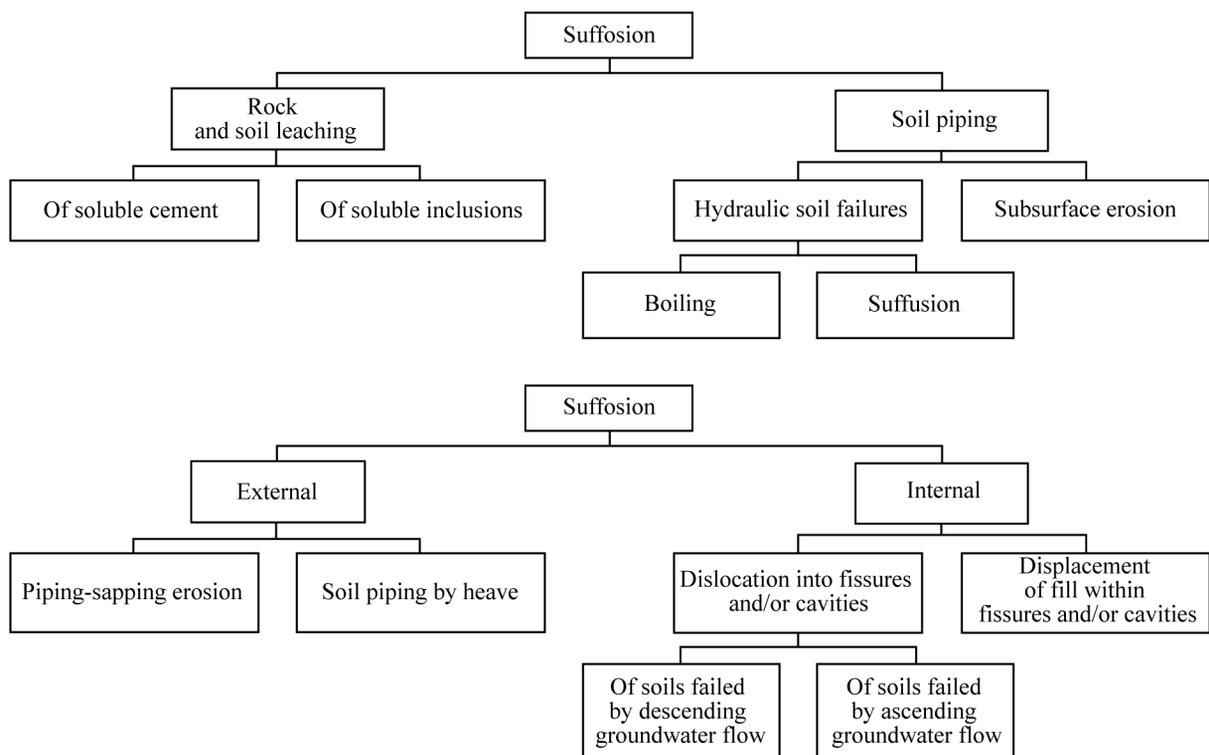


Fig. 2. Classification of suffosion proposed by V.P. Khomenko [3]: by the nature of soil and rock destroyed soils (top) and by the conditions of removal and displacement of destroyed soils and rocks (bottom)

Table 1. Suffosion prone soils and rocks

Suffosion prone soils and rocks		Type of suffosion	
Fissured clastic sedimentary rocks with soluble cement		Rock leaching of soluble cement	
Soils	Cohesive and cohesionless	Permeable saline	Soil leaching of soluble inclusions
		Any	Subsurface erosion
	Cohesionless	Any	Boiling
		Gap-graded	Suffusion

countries, and located on different continents, for example, in Israel [8], in Iran [9], in Nigeria [10], in Poland and Spain [11], in the United States [12]. Of course, this requires the application of certain measures to prevent and even exclude the development of suffosion processes, but the ideas about such measures and their necessary justification are not systematized anywhere in the world. In our country, normative documents still do not contain the concept of “antisuffosion protection”, although similar phrases are used in relation to other geological processes dangerous for construction.

MATERIALS AND METHODS

The study of suffosion processes has been carried out by the author of this article since 1975 and continues up to the present, with the greatest social damage caused by suffosion and not related to hydraulic engineering construction observed by him at the end of the last century (Fig. 1). The broad understanding of the term “suffosion” necessitates the classification of this geological process hazardous to construction, primarily as shown in Fig. 2. This, in particular, is required to concretize the concept of “suffosion-unstable rocks (soils)” (Table 1), which used to be applied exclusively to cohesionless gap-graded soils. There is also a need for a clear idea of the conditions under which suffosion outflow and transit can take place (Table 2). It should be noted that in English the term “chemical suffosion” corresponds to the term “leaching” [13], and the term “mechanical suffosion” with some reservations

corresponds to the term “soil piping” [14]. In addition, in different countries of the world, near-slope mechanical suffosion is often referred to as “internal erosion”, “subsurface erosion”, and “tunnel erosion”.

The development of suffosion leads to the formation of underground and surface suffosion manifestations. The former are structural elements of the rock massif. These may be some areas of destructed rocks and unconsolidated soils (with clear or blurred boundaries), quicksand bodies, as well as cavities of various configurations. Surface suffosion manifestations include pseudovolcanoes (most often representing so-called sand volcanoes), niches (sometimes reaching the size of caves) with accumulative “plumes”, landslides, collapse sinks, subsidence and swallow holes. All these landforms, with few exceptions, are formed not only and not so much due to suffosion, but also due to other geological processes, which include gravitational slope processes, as well as collapse, flow, deflection and compaction of soils and rocks. Surface suffosion manifestations can be formed not only on the earth surface, but also under the footings of foundations of various construction objects.

According to J. Hutchinson [15], the first scientific publication containing a detailed description of suffosion manifestations formed as a result of near-slope filtration destruction of dispersed rocks (seepage erosion) on the territory of Great Britain (Kent County) appeared in the late 18th century. Nowadays, all over the world, rural residents are usually well aware of the presence

Table 2. Necessary conditions to dislocate soils and rocks during and after suffosional failure

Geomorphic and geological features securing dislocation of soils and rocks during and after suffosional failure			Type of suffosion
Topographic features	Subsurface geological features	Hydrogeological conditions	
Presence of slope	Any	Groundwater discharge as depression or contact spring	Piping/sapping erosion
		Groundwater discharge as artesian spring	Soil piping by heave
Any	Presence of unfilled fissures and/or cavities	Ascending groundwater flow	Dislocation into fissures and/or cavities of soils failed by ascending groundwater flow
		Descending groundwater flow	Dislocation into fissures and/or cavities of soils failed by descending groundwater flow
	Presence of filled fissures and/or cavities	Descending or horizontal groundwater flow	Displacement of fill within fissures and/or cavities

of surface suffosion in the areas accessible to them, but in urban areas they are quickly forgotten, as local authorities try to eliminate them as quickly as possible. In principle, suffosion manifestations should be detected to the fullest extent possible in the course of site investigations, and drilling, penetration tests and geophysical methods should be used to search for underground manifestations of suffosion. Genetic identification of suffosion manifestations is still a serious problem, which requires an in-depth analysis of the engineering-geological situation.

On the territory of our country, the conditions necessary for the development of suffosion are very widespread, as evidenced by the map compiled by I.G. Spiridonov, V.P. Khomenko and S.V. Egorkin, included in CP 115.13330.2016². Sometimes suffosion processes of natural origin confined to undeveloped and underdeveloped areas can form geological objects of aesthetic, scientific, cognitive and recreational value (e.g., caves or lakes formed on the site of collapse sinks). However, despite this, negative consequences clearly dominate in the interaction of suffosion with the sphere of human activity. Suffosional failure of soils and rocks results in a deterioration of their strength and deformation characteristics, as well as an increase in their water permeability. When suffosionally destructed soils and rocks are in the zone of interaction with an engineering structure, it can lead to its deformation. It is much worse if subsidence, collapse sink or landslide caused by the development of suffosion suddenly comes into contact with building structures that are not protected against such excesses. Water losses from artificial watercourses and reservoirs associated with suffosional decompaction of soils and rocks as well as with suffosional removal of crack and cavity filler are also extremely undesirable. According to A.L. Ragozin [16], by the end of the last century, the damage from the development of suffosion processes in Russia was observed in 958 cities, and at present the situation has clearly not changed for the better.

The analysis of economic damage caused by suffosion to economic objects of various purposes has shown that within the framework of specific natural-technical (lithotechnical) systems, specific forms of interactions between the suffosion process and the object are observed. Four situations can be encountered. In the first situation, there is a practically one-sided impact of the natural origin suffosion process on the object. The second situation is a mutual influence on each other of the object and the suffosion process of anthropogenic origin, which is the result of the functioning of this object. The third situation is similar to the second, but with the difference that the technogenic suffosion is the result of the functioning of another object. Finally, the fourth situation is characterized by the impact of the object

on the suffosion, which does not result in negative consequences either for itself or for any other object. The first situation is the easiest to predict, the third situation is the most difficult to predict, and the fourth situation should be strived for in the construction development of territories.

Suffosion can also have negative impacts on the environment. It is considered that the consequences of such impacts do not reach the level of ecological disaster [17], but may well generate environmental emergencies. The resulting damage is associated with the disfigurement of landscapes, with the pollution of ground and surface waters with the products of suffosion outflow, with the loss of water from natural and artificial watercourses and reservoirs, with fatal consequences for biocenoses (including in the agricultural sphere), with the spontaneous filling of negative forms of suffosion relief with household rubbish.

The study of the causes of the development of suffosion processes in some regions of the Russian Federation has revealed a number of negative facts indicating that suffosion is often generated by careless implementation of protective measures aimed at combating other geological processes dangerous for construction. This has an extremely unfavourable effect on the operation of various economic facilities up, even leading to emergency situations. The most widespread such excesses are related to landslide drainage (Fig. 3, *a*) and protection from erosion and abrasion destruction of natural and artificial water bodies' banks (Fig. 3, *b*). Other situations are also encountered. For example, protection against a landslide formed on the slope of the hill on which the Resurrection New Jerusalem Monastery is located was made in the form of a complex rigid structure supplemented by a tubular drainage. It consists of two pile-supported reinforced concrete elements (an upper retaining wall and a lower strip stop) connected by metal trusses spanning the slope. A few months after the commissioning of this structure, subsurface erosion started to develop actively in the contact zones

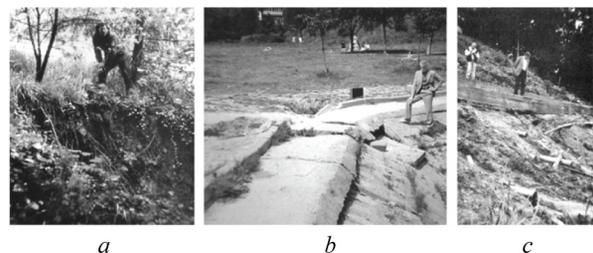


Fig. 3. Examples of suffosion activation initiated by measures on protection from other dangerous geological processes (photo by V.P. Khomenko): *a* — collapse sink caused by suffosion soil removal into landslide-proof drainage adit (Sochi, 1988); *b* — suffosion soil removal from under concrete slabs of the pond bank protection cover accompanied by its destruction (Moscow, 1992); *c* — slope suffosion caused by poor quality of landslide protection (Istra, Moscow region, 1996)

² CP 115.13330.2016. Geophysics of hazardous natural impacts.

Table 3. Classification of anti-suffusion protection measures

Type of protection		Realization time in relation to protecting object creation	Necessary substantiation (except results of geological site investigation)
Passive	Planning	Only before	Zonation of territory by degree of suffusion danger
	Constructional	Before or after	Forecast of on-surface suffusion manifestations size
	Controlling		Concept of suffusion development
Active	Provoking	Only before	Identification of suffusion prone soils and rocks
	Preventive		Determination of suffusion arising and/or development criteria
	Operative	Only after	Assessment of possible adverse accessory effects
	Barrier	Before or after	

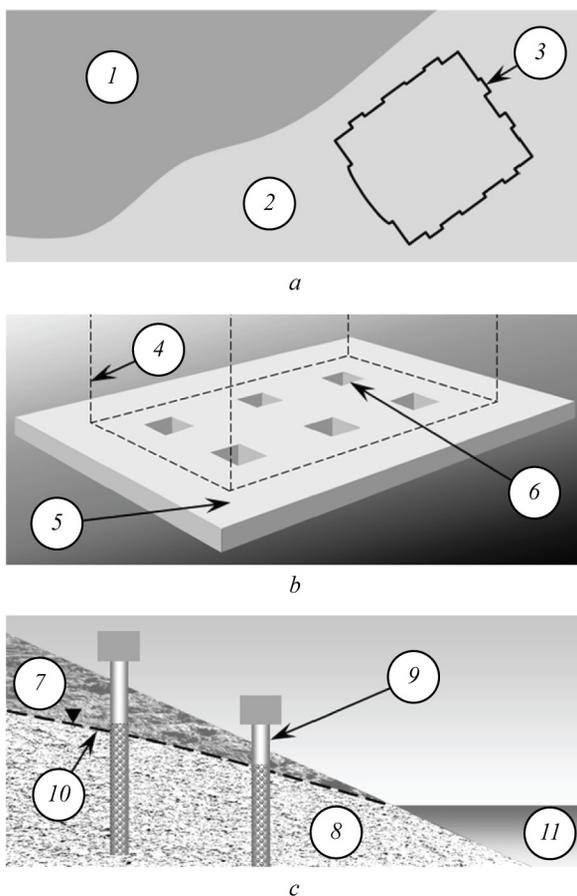


Fig. 4. Schemes illustrating the principles of passive anti-suffusion measures: *a* — planning (on the example of optimal building location); *b* — constructional (on the example of monolithic reinforced concrete foundation); *c* — controlling (on the example of groundwater regime observation); 1 — site dangerous from the point of view of the possibility of suffusion development; 2 — site safe from the point of view of the possibility of suffusion development; 3 — building contour in plan; 4 — building contour in perspective; 5 — cantilever outlets; 6 — through hole intended for operational filling of the collapse sink; 7 — suffusion-resistant and (or) suffusion-unstable rocks; 8 — suffusion-unstable rocks; 9 — observation well with necessary equipment; 10 — groundwater level; 11 — water body

of the strip stop and drainage pipes with soils composing the slope (Fig. 3, *c*).

RESEARCH RESULTS

It is possible to reduce the level and sometimes to avoid negative social and environmental consequences associated with the development of suffusion processes by applying special protection measures for territories, buildings and structures. Anti-suffusion protection, despite the extremely rare use of this word combination, exists as a fact and has a rich history in our country [18]. To protect against suffusion processes and the consequences of the formation of surface suffusion manifestations, different techniques are used, sometimes aimed at combating only suffusion, and sometimes well known as measures counteracting the destruction caused by other exogenous geological processes. To solve the problems of antisuffusion defence, the means (mainly of provoking character [3]), seemingly not intended for this purpose, can also be used.

Comprehensively reviewing the above-mentioned technical methods, the author of the article came to the conclusion that it is advisable to systematize them according to a number of interrelated qualitative features of different types of antisuffusion protection, which in some cases may be mutually exclusive. As such attributes were chosen:

- the degree of intervention of the protective measure in the mechanism of the suffusion process;
- the time of implementation of the protective measure in relation to the time frame of the development of the suffusion process and the construction of the protected object;
- the technological features of the application of protective measures.

As a result, a classification was created, presented in the form of Table 3. It requires some explanations. Firstly, the principal difference between passive anti-suffusion measures and active ones is that the latter have a direct impact on the course of the suffusion process, while the former do not. Secondly, the preventive nature of protection differs from the operational one in that

it implies its implementation before the construction or operation of the protected object (or before the onset of the suffosion process), and not in a “fire” order. In addition, Table 3 provides information on the type of additional information required (beyond that obtained from standard geotechnical surveys, of course) to justify the types of suffosion protection identified. Each of these is summarized below.

Passive antisuffosion protection (Fig. 4) includes planning, constructional and control ling measures, the basic principles of implementation of which are applicable to protection from any other geological processes dangerous for construction. Planning measures realize the escapist principle of maximum avoidance of projected area (Fig. 4, *a*) and linear structures to get into the predicted hazardous zones or selection of a peculiar configuration of buildings in the plan, allowing to “streamline” the hazardous areas. The purpose of constructional protection is to apply such a design of construction objects or to supplement it with such elements that will not allow the protected object to deform in case of sudden movements of the soils underlying it. The design of such protection is carried out, of course, taking into account the size of the expected movements, for example, the diameter of the collapse sink (Fig. 4, *b*). The control ling measures include stationary observations of groundwater levels and chemical composition (Fig. 4, *c*) and the relief of the ground surface at the site of the protected object, the movement of soils interacting with it, as well as the condition of the object itself.

Active antisuffosion protection (Fig. 5) combines measures that can provoke and prevent the development of suffosion and processes forming surface suffosion manifestations, as well as operate and made barrier the development of such processes, hence the names of these protective measures. Provoking antisuffosion measures are rarely used due to the difficulty of confi-

dently predicting their final outcome. They are reduced to intensive watering of un saturated soils, to artificial increase of filtration rate in saturated soils and to dynamic or percussive (up to explosive) impacts on soils (Fig. 5, *a*). All this continues until subsidence, collapse sink or landslide occurs on the ground surface. The measures preventing (and, in fact, excluding) the appearance and development of suffosion processes and processes forming suffosion manifestations, in most cases represent nothing more than the fulfilment of the prescriptions of the current construction norms in the presence of certain geological risks. Interestingly, these regulations do not always use the term “suffosion” and its derivatives. The most striking example of such solutions is the removal of suffosionally unstable rocks from zones of their interaction with the protected object (Fig. 5, *b*).

Suffosion process management (or operative measures) implies artificial reduction of underground flow velocity and dissolving capacity of moving water. Most often this is achieved by dewatering the soils and rocks (Fig. 5, *c*), but under certain conditions the same result can be obtained by watering them, accompanied, if necessary, by changing chemical composition of the water. The list of barrier measures of antisuffosion protection includes:

- creation of barriers on the way of water infiltration into suffosion-unstable soils and rocks and its filtration in such soils and rocks;
- prevention of atmospheric precipitation accumulation on the earth surface;
- dripping and dispersal of groundwater outlets on the earth surface;
- filling (tamponage) of cavities and cracks;
- technical reclamation (in particular grouting) of suffosion-unstable (Fig. 5, *d*) and overlying soils.

It should be noted that implementation of operative and barrier antisuffosion measures requires serious

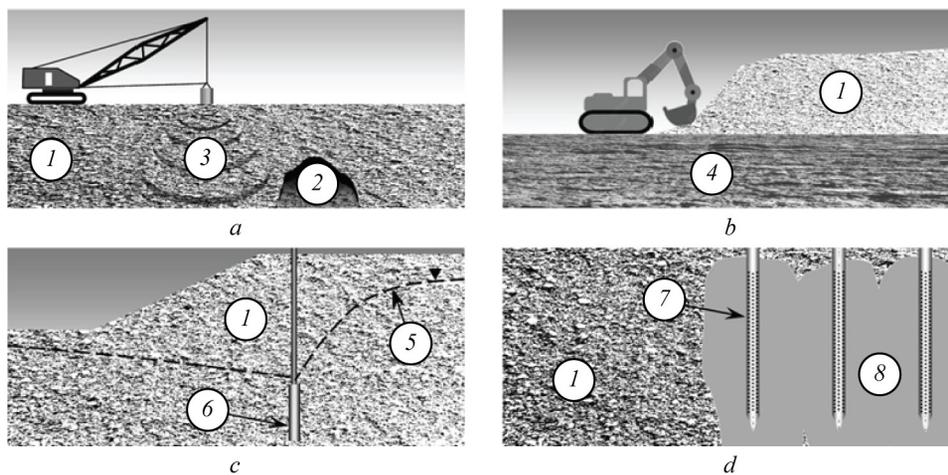


Fig. 5. Schemes illustrating the principles of active antisuffosion measures: *a* — provoking (by the example of dynamic impacts on soils); *b* — preventive (by the example of removal of suffosion unstable soils); *c* — operative (by the example of vertical drainage); *d* — barrier (by the example of soil consolidation); 1 — suffosion unstable rocks; 2 — suffosion cavity; 3 — shock waves; 4 — suffosion stable and (or) suffosion unstable rocks; 5 — groundwater level; 6 — wellpoint; 7 — injector; 8 — stabilized soil

justification, as these measures may cause activation of other geological processes dangerous for construction in the vicinity of the protected object.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Solving problems related to the prevention, minimization and elimination of negative social and environmental consequences of the development of suffosion processes in urban areas requires a special approach, which is very difficult to formalize³. The development of clear algorithms of actions in such conditions is a matter of the future, because here we have to face unexpected and paradoxical situations [19]. It is much easier to solve such problems in the economic development of undeveloped territories. In this case, it is advisable to proceed as follows.

At the first stage, after familiarization with the information obtained from various sources, and possibly also as a result of some reconnaissance survey of the area, a conclusion should be made about the presence of suffosion occurrences in the territory to be developed. Here the greatest difficulty is their genetic identification, which can be confidently confirmed only at the next stage. The main outcome of the first stage should be a conclusion on the expediency of preservation and possibly development of any suffosion mani-

³ Dimukhametov D.M., Novoposelenskikh L.A., Bakhareva N.S. Suffosion processes in urban areas. *Modern problems of science and education*. 2015; 2:2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22188>

festations as valuable natural objects, or their complete elimination in the course of territory planning. This may require environmental surveys.

The second stage involves site investigations and development of a conceptual model of suffosion development within the framework of the created natural-technical (lithotechnical) system based on their results. At this stage, a rational scientifically-based choice of antisuffosion protection measures is made, after which additional research may be required (zoning of the territory under development by the degree of suffosion hazard, forecast of the formation of suffosion manifestations, identification and study of the composition and properties of soils unstable by suffosion, etc.). Ultimately, clear recommendations should be given on the application of antisuffosion protective measures before the economic development of the territory, during construction and during the operation of designed facilities, taking into account the real need. Obviously, this will require certain economic assessments.

The content of the third (final) stage should be:

- construction of the designed economic objects, preceded or accompanied by implementation of the selected measures of antisuffosion protection;
- monitoring of the condition of these economic objects and the environment;
- adjustment of the adopted engineering solutions, if necessary.

In this case, the expected negative consequences of suffosion development will be minimized or even eliminated, and, possibly, certain positive results in the field of landscape design will be achieved.

REFERENCES

1. Istomina V.S. *Filtration stability of soils*. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1957; 295. (rus.).
2. Lomtadze V.D. *Engineering geology. Engineering geodynamics*. Leningrad, Nedra Publ., 1977; 479. (rus.).
3. Khomenko V.P. *Regularities and forecasting of suffosion*. Moscow, GEOS Publ., 2003; 216. (rus.).
4. Pavlov A.P. About plains' relief and its changes by influence of ground and surface waters' work. *Zemlevedeniye/Earth Sciences*. 1898; 5(3-4):91-147. (rus.).
5. 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. London, British Geotechnical Society, 1979; 5:1-26.
6. 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; 731-745.
7. Suzdaleva A.L., Slesarev M.Y., Yakovleva I.Y. Hazardous geological processes at incomplete construction sites. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2003; 18(10):1599-1607. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1599-1607 (rus.).
8. Nahlieli A., Svoray T., Argaman E. Piping formation and distribution in the semi-arid Northern Negev environment: A new conceptual model. *Catena*. 2022; 213:106201. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106201
9. Kariminejad N., Sepehr A., Poesen J., Hassanli A. Combining UAV remote sensing and pedological analyses to better understand soil piping erosion. *Geoderma*. 2023; 429:116267. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116267
10. Chibuogwu I.U., Ugwu G.Z. Exploring tunnel erosion susceptibility in Southern Nigeria, using direct current geophysical techniques. *African Journal of Environment and Natural Science Research*. 2023; 6(3):67-87. DOI: 10.52589/AJENSR-DDBGL2HW

11. Bernatek-Jakiel A., Nadal-Romero E. Can soil piping impact environment and society? Identifying new research gaps. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2022; 48(1):72-86. DOI: 10.1002/esp.5431
12. Dastpak P., Sousa R.L., Dias D. Soil erosion due to defective pipes: a hidden hazard beneath our feet. *Sustainability*. 2023; 15:8931. DOI: 10.3390/su15118931
13. Kurniawan A., Mc. Kenzie J., Putri J.A. General Dictionary of Geology. *Yogyakarta: Department of Environmental Geography. Gadjah Mada University*. 2009; 60.
14. *Encyclopedia of Geomorphology*. Vol. 1 and 2. Edited by A.S. Goudie. London, Routledge Taylor & Francis Group, 2004; 1201.
15. 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; 250-265.
16. Ragozin A.L. The concept of permissible risk and civil engineering at territories with development of hazardous natural and man-made processes. *Project*. 1993; 5-6:250-253. (rus.).
17. Trofimov V.T., Krasilova N.S. Geodynamic criteria of the assessment of environmental and geological conditions. *Environmental geoscience. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2000; 3:257-263. (rus.).
18. Khomenko V.P. Antikarst and antisuffosion protection in Russia: history and present situation. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13(4):231-238. (rus.).
19. Kashperuk P.I., Moskalev D.S., Khomenko V.P. Dewatering as a leading factor in the development of suffusion upon the construction of deep foundations. *Environmental geoscience. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2023; 4:18-28. DOI: 10.31857/S0869780923030049 (rus.).

Received November 27, 2023.

Adopted in revised form on December 3, 2023.

Approved for publication on December 4, 2023.

B I O N O T E S : **Victor P. Khomenko** — Doctor of geological and mineralogical sciences, Senior researcher, Professor, Department of Engineering Surveying and Environmental Geology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; khomenko_geol@mail.ru.