

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

УДК 551.435.626

Геотехнический мониторинг и моделирование суффозионного провалообразования на урбанизированных территориях

Д.М. Димухаметов, А.В. Татаркин, П.А. Красильников, Ш.Х. Гайнанов,
Ж.Ю. Волошина

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: seredin@nedra.perm.ru

(Статья поступила в редакцию 27 мая 2022 г.)

Мониторинг состояния природно-технических систем в условиях городских территорий с помощью дистанционных методов позволяет не только фиксировать зоны аномалий различного генезиса, но и создавать возможности для прогноза участков возникновения и скорости роста суффозионных полостей до их проявления на поверхности. Для определения сценариев формирования провалообразований проведено физическое гидрогеологическое моделирование. Немаловажную роль при локализации потенциально опасных областей с нарушенными физико-механическими свойствами природно-технических систем играют методы неразрушающего контроля. Выявленные закономерности позволяют выполнять прогнозные оценки и идентификацию опасных процессов.

Ключевые слова: *суффозия, геотехнический мониторинг, методы неразрушающего контроля.*

DOI: 10.17072/psu.geol.21.2.229

Введение

Провалообразование на территориях городов наносит значительный ущерб инфраструктуре и создает непосредственную угрозу для населения. Прогноз конкретного места, времени и параметров суффозионного провала в условиях техногенно измененной системы является весьма сложной задачей с учетом непредсказуемости возникновения факторов его определяющих (Stroková, 2021). К ним в первую очередь относятся дефекты водонесущих коммуникаций и связанные с ними утечки, и дренаж (Быков, Димухаметов, 2001). Фактически последствия суффозионного выноса фиксируются и локализуются уже на стадии активного провалообразования с обрушением строительных конструкций и автодорожного полотна. Вся стадия подготовки и зарождения суффозии скрыта грунтовой толщей и дорожным покрытием (рис. 1–3).

Наряду с характеристикой природных условий, включая геолого-литологический разрез, коэффициент неоднородности, раз-

мываемость и фильтрационные свойства грунтов, уровни и агрессивность грунтовых вод, большую роль в развитии процесса играют техногенные составляющие (Котлов, 1977).



Рис. 1. Провал в г. Витебск (2011 г.)

В первую очередь интерес представляют наличие, глубина заложения и срок эксплуатации водонесущих сетей, поскольку одним из ведущих факторов развития суффозии яв-

ляются аварии на водоводах и коллекторах, которые опосредованно становятся следствием их изношенности.



Рис. 2. Провалы по ул. Луначарского в г. Перми (2020 г.)



Рис. 3. Провал на ул. Кирова (Пермская) г. Перми (2011 г.)

Наряду с техническими условиями функционирования подземных сооружений важна информация о наличии и морфометрических параметрах как потенциальных, так и активных зон выноса частиц грунта подземными водами. Они, как правило, приурочены к канализационным колодцам, коммуникациям, лоткам с другими водонесущими коммуникациями, подземным частям старых выработок и современных зданий.

Проработка исходных данных о природных и техногенных условиях позволяет выделить потенциально опасные участки для разработки программы дальнейших исследований в масштабах, соответствующих целям

и стадиям проектирования. Морфометрическая характеристика провалов и времени их образования с учетом их приуроченности к инженерным сооружениям позволяет классифицировать суффозионные процессы, выделить наиболее активные факторы именно для данного типа.

Структура и принципы всех существующих в настоящее время классификаций суффозии зависят от понимания их авторами этого термина и соответствующих наборов классификационных критериев-признаков.

Ряд классификаций имеет частный характер, обусловленный узкой трактовкой понятия «суффозия», когда этим словом обозначают только фильтрационное разрушение дисперсных пород. В подобных классификациях обычно выделяют два типа процесса по характеру его развития и проявления. Например, К. Терцаги и Р. Пек считали, что суффозия может принимать вид выпора или ограниченного в пространстве регрессивного фильтрационного разрушения пород, сопровождающегося их выносом, – подземной эрозии.

Немецкий исследователь Ю. Цимс в предложенной им классификации выделил три типа свободного перемещения частиц фильтрационным потоком сквозь поры: внутри массива (внутренняя суффозия), на выходе потока (внешняя суффозия) и в контактной области (контактная суффозия) (Хоменко, 2006; Хоменко, 2022).

Классификация А.Г. Лыкошкина включает в себя как механическое, так и химическое разрушение пород потоком подземных вод. При этом пластовая механическая суффозия в «скелетных» породах проявляется как вынос частиц из пор, а в «нескелетных, условно однородных» – в виде разнообразных деформаций, сопровождающихся выносом крупных масс разрушенных пород.

Специальные классификации применимы к определенным геологическим условиям и проявлениям. Так, В.А. Мироненко и В.М. Шестаков рассматривали фильтрационные деформации в откосах как следствие свободного выноса частиц из пор (механическая суффозия), выпора и обрушения, оплывания и фильтрационного выноса вдоль трещин.

В рамках общих классификаций суффозии, авторы исходят из широкого понимания этого термина. К ним, прежде всего, следует отнести классификацию Н.М. Бочкова. В этой классификации под химической суффозией понимается выщелачивание растворимых солей, под колоидальной – сложный процесс размывания глинистого грунта, под механической – вынос частиц грунтового скелета (прерывная механическая суффозия) или заполнителя пор (непрерывная механическая суффозия), под суффозией массы – вынос крупных масс грунта.

Согласно классификации Архидьяконских 1983 г., по характеру и виду локального изъятия вещества гидросферы выделяется 4 основных типа суффозии: дренажный, денудационный, дренажно-денудационный и сложный.

Дренажный тип суффозии обусловлен локальным понижением уровня жидкости в пластах практически без процессов растворения, механического разрушения и выноса, сопровождающимся компенсационным уплотнением водосодержащих пород. Следствием уплотнения является проседание кровли с образованием характерных поверхностных форм (ложбин и котловин).

Денудационный тип включает в себя локальное механическое, гидромеханическое, химическое изъятие определенных горных пород на глубине, сопровождающееся компенсационным проседанием или обрушением кровли разуплотненного участка пород, с образованием понижений рельефа или воронок обрушения.

Дренажно-денудационный тип суффозии связан с локальным повышением разрушающей и растворяющей способности вод (прежде всего скорости), вызванным, например, усилением дренажа.

Механическое разрушение и растворение приводит к расширению пор и ходов водотоков в толще и, следовательно, к увеличению темпов разрушения породы (Аникеев, 2008).

Понижение уровня подземных вод и снижение механической прочности грунтов и пород, как правило, приводит к компенсационному прогибанию или обрушению кровли, хотя на начальных стадиях развития процес-

са деформации не всегда достигают поверхности.

Иногда дренаж и, следовательно, скорости движения воды могут уменьшаться за счет уплотнения пород или обрушения с последующим перекрытием и сжатием ходов движения жидкости. Далее процесс развития скрытой полости возобновляется по мере увеличения гидродинамического давления. С данным типом суффозии в природных условиях связано начало формирования некоторых типов оврагов и суходолов.

Сложный тип представляет собой последовательную смену во времени или одновременное наложение нескольких типов суффозии.

Вопросы классификации суффозии весьма подробно отражены в работах В.П. Хоменко, А.Г. Лыкошкина и пр. авторов (Хоменко, 2006; Хоменко, 2022).

Стоит отметить, что выбор определенной классификации суффозионного процесса является необходимым условием для разработки программы геотехнического мониторинга и моделирования процесса, поскольку изначально включает в себя весь набор активных факторов и условий развития процесса. В этой связи разработка общей системы классификации с учетом факторов и особенностей развития процесса в разных природно-техногенных условиях для решения практических задач моделирования, прогноза и ликвидации последствий суффозии является одним из важных направлений (ALsakan, 2021).

Выбор методики моделирования суффозионного процесса во многом обусловлен типами процесса, набором факторов его развития, включая состав, условия залегания и свойства природных и техногенных грунтов, гидрогеологические условия, а также приуроченность активных зон к конкретным инженерным сооружениям, дефекты которых зачастую и являются причиной суффозионных деформаций в условиях городских территорий.

В лабораторных условиях достаточно наглядные результаты дают опыты так называемого физического гидрогеологического моделирования в фильтрационных лотках. Опыт использования данных экспериментальных установок разных типов описан в работах В.П. Хоменко.

На кафедре инженерной геологии и охраны недр ПГНИУ были проведены опыты физического моделирования суффозии в фильтрационном лотке с целью количественного прогнозирования условий и параметров суффозионного провалообразования в песчаных грунтах при образовании дефектов разных сечений канализационных систем на различных глубинах. Выбор метода обоснован тем, что использование данной установки позволяет не только наглядно проследить все стадии развития суффозии, начиная с предварительного замачивания, разжижения, но и количественно оценить скорости формирования внутренних полостей и провалов на поверхности, объемы выноса грунта, критические значения показателей, при которых начинается активная фаза процесса. Эти данные, в свою очередь, могут иметь практическое применение для количественного прогнозирования деформаций в определенных природно-техногенных условиях, а также при геотехническом мониторинге, в том числе геофизическими методами неразрушающего контроля (Abetov, 2021).

Испытания карьерных песков средней крупности, используемых, как правило, при засыпке котлованов трасс городских коммуникаций, планировке территории, позволили проследить все фазы и стадии развития суффозии от предварительного замачивания и «разжижения» грунтов, формирования первичных ходов и полостей, до провалообразования на поверхности. Важным преимуществом физической модели на базе фильтрационного лотка является то, что, кроме наглядности фиксации фаз процесса, существует возможность создавать различные условия эксперимента, связанные с глубиной зоны выноса и разгрузки грунтов для разных сечений предполагаемых дефектов, расходом воды и типом фильтрации (вертикальная, горизонтальная, напорная и пр.), литологическим типом разреза для грунтов различной степени уплотнения. Как указывалось ранее, наибольший интерес представляют опыты с техногенными грунтами, поскольку поверхностные деформации и провалы на территории городов приурочены в основном к ним.

Скорость развития суффозии с начала замачивания до формирования провала на поверхности при прочих равных факторах при

вертикальной нисходящей фильтрации меняется в зависимости от площади сечения предполагаемого дефекта водонесущей коммуникации, выполняющей роль зоны разгрузки подземных вод и аккумуляции вынесенного материала. Так, полный цикл провалообразования для предполагаемого дефекта сечением 4 см^2 при наличии песчаного слоя мощностью $0,5 \text{ м}$ составляет порядка $6\text{--}8$ мин., для сечения $8\text{--}12$ время образования провала составляет уже около $4\text{--}6$ мин. Форма и углы падения стенок провалов также различны при разных сечениях, что обусловлено, по-видимому, условиями разгрузки воды и параметрами сформировавшихся «псевдоплавунных» зон. После завершения фазы обрушения кровли грунтов и выхода провала на поверхность происходит эрозийное разрушение и выполаживание его стенок. Важно, что при образовании деформаций на автодорожных покрытиях при обрушении полотна создаются условия для дополнительного подтока воды с поверхности и активизации процесса.

Анализ и обработка данных физического моделирования для разных мощностей песков, сечений дефектов и предварительная прогнозная оценка динамики суффозионного провалообразования позволяют сделать вывод о скорости, объемах выноса грунтов, диаметрах провалов на поверхности. Так, полный цикл провалообразования в песках с предполагаемым дефектом сечением от 4 до 12 см^2 на глубине $2,0 \text{ м}$ при нисходящей фильтрации может составлять от $45\text{--}60$ мин. до нескольких часов. Диаметр провала на момент обрушения может достигать $80\text{--}120 \text{ см}$ в зависимости от сечения дефекта и однородности разреза.



Рис. 4. Суффозионная воронка при мощности грунта $0,5 \text{ м}$ и сечении дефекта 12 см^2

С учётом быстротечности процесса суффозии в техногенных грунтах городских территорий и приуроченности зон разгрузки воды к объектам городской инфраструктуры (в том числе при авариях на городских канализационных и водопроводных сетях) задачи качественного, количественного прогноза, мониторинга и предотвращения последствий провалообразования приобретают значительную сложность.

Среди приоритетных направлений изучения образования провалов на территориях городов, наряду с анализом природных и техногенных факторов, изучением объектов-аналогов, физическим и математическим моделированием, составлением схем районирования, важным аспектом является геотехнический дистанционный мониторинг факторов, определяющих подготовку, возникновение и развитие деформаций на всех стадиях.

Общий алгоритм геотехнического мониторинга развития суффозии на территории города можно представить в следующем виде:

Предварительный анализ природно-техногенных условий участка, включая геолого-литологические, гидрогеологические условия, схему размещения водонесущих коммуникаций (с указанием времени их эксплуатации, глубины их заложения, аварийных ситуаций и т.д.);

Морфометрическая характеристика провалов и динамики их образования с учетом типов суффозии и приуроченности их к конкретным инженерным сооружениям;

Зонирование территории по интенсивности провалообразования и техногенной нагрузке для локализации перспективных участков для полевых исследований;

Разработка программы геотехнического мониторинга суффозионных процессов для конкретных типов суффозии и приуроченности их к определенным инженерным сооружениям;

Обследование массива методами неразрушающего контроля (акустические, электромагнитные и т.п.) с дальнейшим выделением потенциально опасных участков;

Стандартизация полученных данных для дальнейшего накопления, визуализации и 3D моделирования с помощью ГИС;

Разработка методики моделирования и прогноза провалообразования по индикаци-

онным признакам с помощью корреляционного анализа факторов, и сопоставление полученных результатов с натурными наблюдениями за суффозионными процессами для подтверждения полученных выводов.

Среди методов неразрушающего контроля для мониторинга и прогноза развития суффозии могут применяться геофизические исследования в модификации электромагнитного зондирования (Татаркин, 2020; Lago, 2022). Вследствие ограничений, связанных с условиями заземления, реализация контактных методов сопротивления, в частности, электротомографии на урбанизированных территориях трудоёмка, а иногда недостижима. В настоящее время существуют модификации, позволяющие проводить исследование в бесконтактном варианте. Кроме того, высокой производительностью и возможностью работы без заземлений с компактными измерительными установками обладает метод РМТ-К (Сараев, 2013). Однако использование вышеописанных бесконтактных модификаций сопряжено с низкочастотным диапазоном электромагнитных полей, на который оказывают влияние электромагнитные поля промышленных помех и индукционные наводки от существующих подземных коммуникаций.

Одним из альтернативных способов изучения потенциальных и активных зон провалообразования является георадиолокационное зондирование (Lago, 2022). Данный метод позволяет с необходимой детальностью исследовать приповерхностную толщу грунтов с целью выявления зон разгрузки (питания) подземных вод и локализации коммуникаций, связанных с подземными инженерными сооружениями. В связи с этим следует определить ряд особенностей использования георадара для изучения суффозии на территориях городов.

На этапе ведения полевых работ необходимо учитывать геоэлектрические условия, которые могут осложнять волновую картину. Для повышения однозначности интерпретации рекомендуется выполнение площадных исследований многоканальными установками или псевдомногоканальными (в случае их отсутствия). В таком случае возможно построение трехмерных кубов волнового поля

для более уверенной корреляции выделяемых аномальных зон.

Обработка и интерпретация данных, полученных в результате георадиолокационного зондирования, заключается в выделении пространственных особенностей амплитудно-частотных характеристик волнового поля и их привязки к существующим инженерным сооружениям. Сопутствующими задачами являются оценка и изменение влажности (в довольно узких диапазонах значений), выделение неоднородностей, ослабленных зон (полости, разуплотнения грунтов), скрытых дефектов строительных конструкций, зон трещиноватости и т.д. В волновой картине данные особенности могут выделяться в виде нарушений осей синфазности, изменений частоты, амплитуды и скоростей электромагнитных колебаний. Кроме того, скрытые полости могут отображаться на разрезах в виде структурных особенностей (появлении дополнительных границ) или наличия осей синфазности, связанных с дифракцией волн. На одном из примеров, приведённом на рис. 5, мы видим подобные признаки в виде смещения границ инженерно-геологических элементов дорожного сегмента.

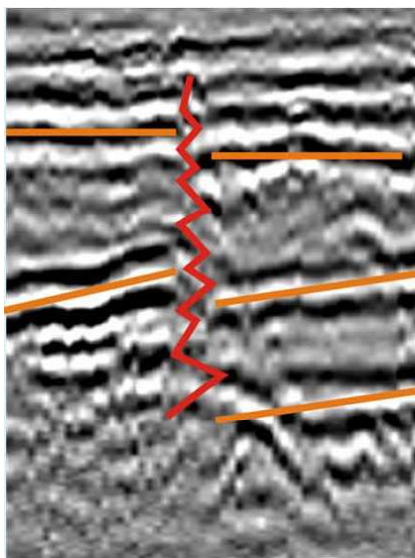


Рис. 5. Разрез дорожной конструкции, полученный по результатам георадиолокационной съемки

Причиной этому являются суффозионные процессы, сопровождающиеся просадкой грунтов и деформациями с образованием трещин в конструкции дорожной одежды на

начальной стадии формирования опасного процесса.

Одним из важных аспектов при изучении суффозионных процессов является определение путей миграции подземных вод и локализация источника обводнения. В данной ситуации георадарное обследование позволяет не только решить инженерно-геологические, геотехнические задачи, но и произвести локализацию инженерных сетей (в первую очередь водонесущих), к которым и приурочены участки утечек воды и области провалообразования (рис. 6).

При этом важно отметить, что применение георадарных технологий позволяет выявлять утечки из подземных коммуникаций на начальных стадиях обводнения грунтов ещё до активной фазы провалообразования, сопровождающегося обрушением несущего покрытия и переходом суффозионного процесса в фазу восходящей фильтрации с разгрузкой на дневную поверхность. На этой стадии вынос частиц грунта приобретает фактически неограниченные возможности для разгрузки, что при соответствующем напоре за короткое время может привести к образованию значительных провалов, создающих опасность для сооружений, автотранспорта и населения.

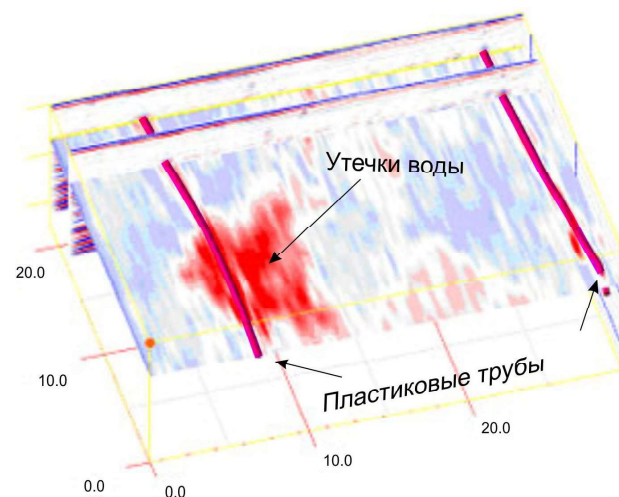


Рис. 6. Пример построения 3-D изображения волнового поля для выявления утечек воды из трубопровода. Красным цветом на слайдах трехмерной картины по оси Z показано наличие и размер утечек из трубы слева

Таким образом, накопление и математическая обработка значительной базы фактических данных о динамике процесса, начи-

ная со стадии подготовки до провалообразования, позволит по характерным признакам-индикаторам и показателям граничных условий активизации процесса спрогнозировать возникновение и рост деформаций в конкретном месте за конкретное время. Это в свою очередь создает возможности для оперативного реагирования и локализации факторов, активизирующих суффозию, и в конечном итоге предотвращения катастрофических последствий. В качестве признаков-индикаторов можно использовать определенные параметрические данные, полученные в результате георадарных исследований, лабораторного физического моделирования.

Библиографический список

- Strokova L.A. & Leonova A.V. (2021). Assessment of suffusion hazard on the territory of Tomsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 332. P. 49–59. doi:10.18799/24131830/2021/05/3185.
- Быков В.Н., Димухаметов Д.М., Димухаметов М.Ш. Эколого-геологическая обстановка города: Учеб. пособие / Под ред. В.Н. Быкова; Перм. ун-т. Пермь, 2001. 101 с.
- Котлов Ф.В., Антропогенные геологические процессы и явления на территории города, «Наука», 1977. 172 с.
- Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2006. 216 с.
- Хоменко В.П. Карстово-суффозионно-обвальное провалообразование и оценка его опасности для зданий и сооружений / В.П. Хоменко, О.К. Криночкина // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2022. № 1. С. 20–29. DOI 10.31857/S0869780922010076. – EDN ORJLNL.
- Аникеев А.В. Изучение карстово-суффозионных провалов на моделях из термопластических материалов / А.В. Аникеев // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2008. № 5. С. 420–435. EDN JJWIOR.
- ALsakran M. & Zhu Jun-Gao & Wu Er-Lu. (2021). Experimental Study for Assessing the Onset of Suffusion and Suffosion of Gap-Graded Soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 57. doi:10.1007/s11204-021-09693-4.
- Abetov A. & Kudaibergenova S. (2021). Integrated research of suffosion and karst processes at the kogcf by geological and geophysical and geodesic methods. *series of geology and technical sciences*. 5. 14-22. doi:10.32014/2021.2518-170X.93.
- Татаркин А.В. Методика прогноза провалов земной поверхности на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 1. С. 121–132. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-121-132.
- Lago Alexandre & Borges Welitom & Barros José & Amaral Elizângela. (2022). GPR application for the characterization of sinkholes in Teresina, Brazil. *Environmental Earth Sciences*. 81. doi:10.1007/s12665-022-10265-4.
- Сараев А.К., Симаков А.Е., Шлыков А.А. Особенности метода радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником, *Вопросы геофизики*. Выпуск 46. СПб., 2013. (Ученые записки СПбГУ; № 446) С. 97–112.

Geotechnical Monitoring and Modeling of Suffusion Sinkhole Formation in Urban Areas

D.M. Dimukhametov, A.V. Tatarkin, P.A. Krasilnikov, Sh.Kh. Gainanov, Zh.Yu. Voloshina

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia E-mail: seredin@nedra.perm.ru

Monitoring the state of natural and technical systems in urban areas using remote methods allows not only to fix zones of anomalies of various genesis, but also to create opportunities for predicting areas of suffusion cavities occurrence and their growth rate before appearance on the surface. To determine the scenarios of sinkhole formation, a physical hydrogeological modeling was carried out. Non-destructive testing methods may play an important role in the localization of potentially dangerous areas with disturbed physical and mechanical properties of natural and technical systems. The revealed regularities make it possible to carry out predictive assessments and identification of hazardous processes.

Keywords: *Suffusion; geotechnical monitoring; non-destructive testing methods*

References

Strokova, L.A. Leonova, A.V. 2021. Assessment of suffusion hazard on the territory of Tomsk. *Bulle-*

tin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 332:49-59. doi:10.18799/24131830/2021/05/3185.

Bykov V.N., Dimukhametov D.M., Dimukhametov M.Sh. 2001. Ecologo-geologicheskaya obstanovka goroda [Ecological and geological situation of the city]. Perm. gos. univ., Perm, p. 101. (in Russian)

Kotlov F.V., 1977. Antropogennye geologicheskie protsessy i yavleniya naterritorii goroda [Anthropogenic geological processes and phenomena on the territory of the city]. Nauka, Moskva, p. 172. (in Russian)

Khomenko V.P. 2006. Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov [Patterns and forecast of suffusion processes]. GEOS, Moskva, p. 216. (in Russian)

Khomenko V.P. Krinochkina O.K. 2022. Karstovo-suffuzionno-obvalnoe provalooobrazovanie i otsenka ego opasnosti dlya zdaniy i sooruzheniy [Liquefaction-collapse sinkhole formation and assessment of its danger to buildings and structures]. Geokologiya. 1:20-29. (in Russian) doi: 10.31857/S0869780922010076. (in Russian)

Anikeev, A.V. 2008. Izuchenie karstovo-suffuzionnykh provalov na modelyakh iz termoplasticheskikh materialov [The study of karst-suffusion sinkholes on models made of thermoplastic materials]. Geokologiya. 5:420-435. (in Russian)

Alsakran M., Zhu Jun-Gao, Wu Er-Lu. (2021). Experimental Study for Assessing the Onset of Suf-

fusion and Suffusion of Gap-Graded Soil. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 57:457-464. doi: 10.1007/s11204-021-09693-4.

Abetov A., Kudaibergenova S. 2021. Integrated research of suffusion and karst processes at the KOGCF by geological and geo-physical and geodesic methods. Series of geology and technical sciences. 5:14-22. doi: 10.32014/2021.2518-170X.93.

Tatarkin A.V. 2020. Metodika prognoza provalov zemnoy poverkhnosti na primere Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliyno-magnievnykh soley [Methodology for predicting sinkholes of the Earth's surface on the example of the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts]. Gornyy informatsionno analiticheskiy byulleten. 1:121-132. doi: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-121-132. (in Russian)

Lago A., Borges W., Barros J., Amaral E.. 2022. GPR application for the characterization of sinkholes in Teresina, Brazil. Environmental Earth Sciences. 81. doi: 10.1007/s12665-022-10265-4.

Saraev A.K., Simakov A.E., Shlykov A.A. 2013. Osobennosti metoda radiomagnitotelluricheskikh zondirovaniy s kontroliruемым istochnikom [Features of the method of radio magnetotelluric sounding with a controlled source], Voprosy geofiziki. 46(446):97 – 112. (in Russian)