

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И
ПРОИЗВОДСТВАМИ/AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND
PRODUCTION**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.89>

**ОЦЕНКА РИСКА ПРОВАЛОВ ГРУНТА ВСЛЕДСТВИЕ УТЕЧЕК В ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЯХ:
ИНТЕГРАЦИЯ СЕНСОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Научная статья

Мишкин Д.В.^{1,*}, Евсеенко Д.И.²

¹ ORCID : 0000-0003-3457-1066;

¹ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация

² ИП Д.И. Евсеенко, Хабаровск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (944664[at]mail.ru)

Аннотация

В условиях активного развития городской инфраструктуры всё более актуальной становится проблема техногенных провалов грунта, возникающих вследствие утечек в подземных коммуникациях. В данной статье предложена комплексная методика оценки риска возникновения таких провалов на основе интеграции данных дистанционного мониторинга с применением сенсорных технологий и пространственного анализа с использованием геоинформационных систем (ГИС). Представленная модель позволяет выявлять потенциально опасные участки, прогнозировать развитие процессов разрушения грунтового массива и повышать эффективность профилактических мероприятий. Методология включает сбор данных с датчиков давления, влажности и вибраций, их обработку, а также построение карт рисков с учётом гидрогеологических и инженерно-технических параметров. Результаты исследования могут быть использованы для повышения безопасности и устойчивости городских территорий за счёт внедрения современных технологий мониторинга и управления рисками.

Ключевые слова: провалы грунта, утечки в коммуникациях, сенсорные технологии, геоинформационные системы, оценка риска, мониторинг подземных сетей, инженерная безопасность.

**RISK EVALUATION OF SINKHOLE COLLAPSE DUE TO LEAKS IN UNDERGROUND UTILITIES:
INTEGRATION OF SENSOR TECHNOLOGIES AND GEOINFORMATION MODELLING**

Research article

Mishkin D.V.^{1,*}, Evseenko D.I.²

¹ ORCID : 0000-0003-3457-1066;

¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

² IP Evseenko D. I., Khabarovsk, Russian Federation

* Corresponding author (944664[at]mail.ru)

Abstract

In conditions of active urban infrastructure development, the problem of technogenic sinkhole collapse caused by leaks in underground utilities is becoming increasingly relevant. This article suggests a complex methodology for assessing the risk of such sinkholes based on the integration of remote monitoring data using sensor technologies and spatial analysis using geoinformation systems (GIS). The presented model allows to identify potentially dangerous areas, predict the development of soil mass destruction processes, and increase the effectiveness of preventive measures. The methodology includes collecting data from pressure, humidity, and vibration sensors, processing it, and drawing up risk maps that take into account hydrogeological and engineering parameters. The results of the study can be used to improve the safety and sustainability of urban areas by introducing modern monitoring and risk management technologies.

Keywords: sinkhole collapse, utility leaks, sensor technologies, geographic information systems, risk evaluation, underground network monitoring, engineering safety.

Введение

Проблема возникновения провалов грунта в городских и пригородных зонах в последние десятилетия приобретает всё большую актуальность. Одной из основных причин формирования техногенных провалов является утечка воды из подземных инженерных сетей — водопроводов, канализации и ливневых коллекторов [1]. Деструктивное воздействие воды на несущие свойства грунта, особенно при наличии насыщений песков, супесей, а также техногенных грунтов, приводит к эрозии, разжижению и последующему разрушению опорных слоёв, что может вызывать локальные обрушения и деформации поверхности.

В условиях Дальнего Востока России, в частности — Хабаровского края, данная проблема имеет свою специфику. Территория региона отличается сложными геолого-гидрогеологическими условиями [8]: на участках застройки нередко присутствуют аллювиальные и переувлажнённые грунты, наличие подземных вод с сезонными колебаниями уровня, а также многослойное строение грунтов с чередованием песчаных, супесчаных и глинистых отложений. В условиях таких слабых и неоднородных оснований утечки из трубопроводов могут выступать триггером к формированию локальных провалов или даже грунтовых карстов техногенного происхождения.

Усугубляется ситуация значительным износом инженерных коммуникаций в жилых микрорайонах, особенно построенных в советский период. При отсутствии регулярного мониторинга, диагностики и профилактики утечек, старые водопроводные и канализационные линии становятся скрытым источником риска. Согласно данным муниципальных и региональных служб, в Хабаровске и Комсомольске-на-Амуре ежегодно регистрируются десятки аварийных ситуаций, связанных с просадками дорожного полотна, обрушениями грунта вдоль трасс подземных сетей и разрывами трубопроводов на фоне подвижек основания.

Современные сенсорные технологии (в том числе беспроводные датчики давления, вибрации, влажности, а также георадары) открывают новые возможности по раннему обнаружению и прогнозированию утечек, а значит — и по снижению вероятности катастрофических провалов. Дополнение сенсорного мониторинга геоинформационным моделированием позволяет анализировать пространственное распределение рисков, учитывать литологические особенности грунтов, инженерную загруженность территории и исторические данные о повреждениях сетей.

Цель данной работы — разработка и обоснование подхода к оценке риска провалов грунта вследствие утечек в подземных коммуникациях с интеграцией сенсорных технологий и ГИС-моделирования [9], с фокусом на применимость метода в условиях Хабаровского края. Задачи включают:

- анализ современных сенсорных методов обнаружения утечек;
- определение геофакторов, повышающих вероятность провалов;
- описание подходов к пространственной оценке риска с помощью ГИС;
- разработку концептуальной модели мониторинга для условий региона.

Обзор литературы

В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к проблеме мониторинга подземных инженерных коммуникаций, особенно в контексте предиктивного выявления потенциально опасных зон и предупреждения провалов грунта. Провалы, вызванные утечками из трубопроводов, представляют собой комплексную проблему, находящуюся на пересечении инженерной геологии, гидрогеологии, урбанистики и информационных технологий.

По данным ряда исследований, например, провалы формируются в результате длительного воздействия воды на грунт, приводящего к его разуплотнению и размыванию. Особенno уязвимы участки с рыхлыми песчаными отложениями, слабосцементированными супесями и техногенными насыпями. Утечки из трубопроводов могут вызывать эффект эрозионного «вымывания» грунта из-под дорожного полотна или фундаментов зданий, что постепенно снижает несущую способность основания.

Особо подчёркивается роль человеческого фактора — плохого состояния сетей, отсутствия системного мониторинга и недостаточной координации между инженерными и геологическими службами. Как отмечено в, именно взаимодействие факторов утечки, геологии и городской застройки в условиях неоптимального контроля создаёт высокий риск провалов.

Современные подходы к обнаружению утечек в подземных сетях включают:

1. Ультразвуковой контроль и анализ отражённых волн [4].
2. Акустические датчики и вибросенсоры.
3. Георадарные системы (GPR), эффективно применяемые для анализа изменений диэлектрических свойств среды вокруг труб [2].
4. Беспроводные сенсорные сети (WSN), работающие на основе магнитной индукции, давления или сигнала [3].

Особое внимание уделяется энергоэффективности и способности систем работать в сложных средах (влажных, зашумлённых, с металлическими экранами). Как показано в работе, успешным примером стала разработка Pipe Safety Unit (PSU) в Южной Корее, сочетающего акустические, гироскопические и акселерометрические сенсоры.

Геоинформационное моделирование позволяет:

- визуализировать распределение инженерных сетей,
- наложить данные о грунтовых условиях, гидрогеологии, нагрузке от застройки,
- анализировать исторические данные аварий и просадок,
- строить индексы риска Sinkhole Risk Index, SRI на основе многокритериального анализа.

Особенно перспективным является подход, сочетающий сенсорные данные с ГИС-моделями. Raza & Salam предложили метод расчёта затухания радиосигнала в многослойной среде (асфальт + грунт), что позволяет точнее проектировать размещение сенсоров и повысить надёжность передачи данных в городских условиях [6], [10].

Таким образом, анализ литературы показывает, что наибольшую эффективность в предупреждении провалов демонстрируют интегрированные системы, в которых сочетаются сенсорные сети (для получения детальных параметров состояния трубопроводов и окружающей среды) и ГИС-платформы (для пространственного анализа и визуализации рисков) (рис. 1).

Однако большинство систем пока не адаптированы под условия восточных регионов России с их климатом, геологией и инфраструктурой, что подчеркивает необходимость разработки специализированного подхода.

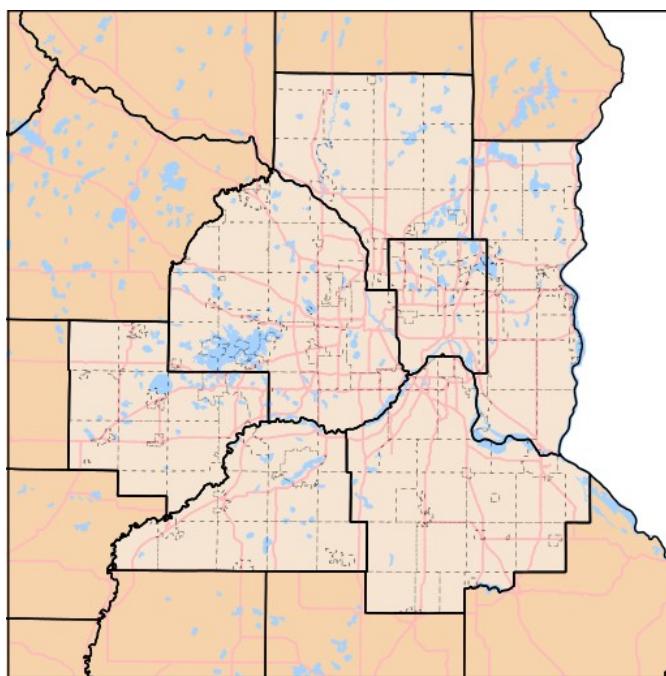


Рисунок 1 - Демонстрационная ГИС карта с коммуникациями
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.89.1>

Методология исследования

Оценка риска провалов, вызванных утечками в подземных коммуникациях, требует комплексного подхода, сочетающего сбор фактических данных о техническом состоянии сетей и окружающей грунтовой среды с их пространственным анализом [2]. Разрабатываемая методология базируется на интеграции сенсорного мониторинга, геоинформационных систем и классификации геотехнических условий. Она адаптирована под геологические особенности территории Хабаровского края и включает как элементы моделирования, так и инструменты оперативного наблюдения.

В качестве основного источника данных используются беспроводные сенсорные узлы (WSN), объединяющие:

- датчики давления и утечки в трубопроводах (на основе акустических и пьезоэлектрических преобразователей);
- вибрационные и акселерометрические сенсоры для регистрации микросдвигов и подвижек грунта;
- датчики влажности и электропроводности почвы вокруг труб;
- при необходимости — георадарные сканеры (GPR) для контроля изменений в структуре грунтов в радиусе до 2 м от коммуникации.

Каждый узел передаёт данные по радиоканалу на локальные шлюзы, связанные с облачной платформой или геоинформационной базой данных. Система проектируется с учётом условий дальневосточного климата (низкие температуры, промерзание грунта, высокий уровень подземных вод).

Поступающие с сенсоров данные обрабатываются в геоинформационной среде, включающей:

- цифровую модель рельефа и глубинного строения (инженерно-геологические карты);
- карту залегания подземных коммуникаций и аварийных участков;
- слои по уровню подземных вод, типу и влажности грунта;
- карту плотности застройки и нагрузки на грунт.

На основе анализа указанных данных и исторических событий (провалы, аварии, ремонты) производится градуировка риска с помощью многокритериального подхода и формируется Sinkhole Risk Index (SRI) [6].

Формула оценки SRI (концептуальная):

$$SRI = f(U, G, W, D, T)$$

где:

- U — утечка (сила сигнала сенсора, локализация),
- G — тип грунта (глинистый, супесь, песок, техногенный),
- W — влажность и уровень подземных вод,
- D — плотность застройки/нагрузка на грунт,
- T — тектоническая/геодинамическая активность района.

Для проверки подхода предлагается провести экспериментальное моделирование на тестовом участке в черте города Хабаровска, например — в зоне с известной аварийностью сетей. В рамках эксперимента: в грунт закладываются трубопроводы (или муляжи), вблизи размещаются датчики (в т.ч. датчики влаги и GPR), имитируется утечка с регулируемым расходом, фиксируются изменения показаний сенсоров, включая динамику сдвигов и рост влажности, данные обрабатываются в ГИС и сравниваются с расчётным SRI (рис. 2).

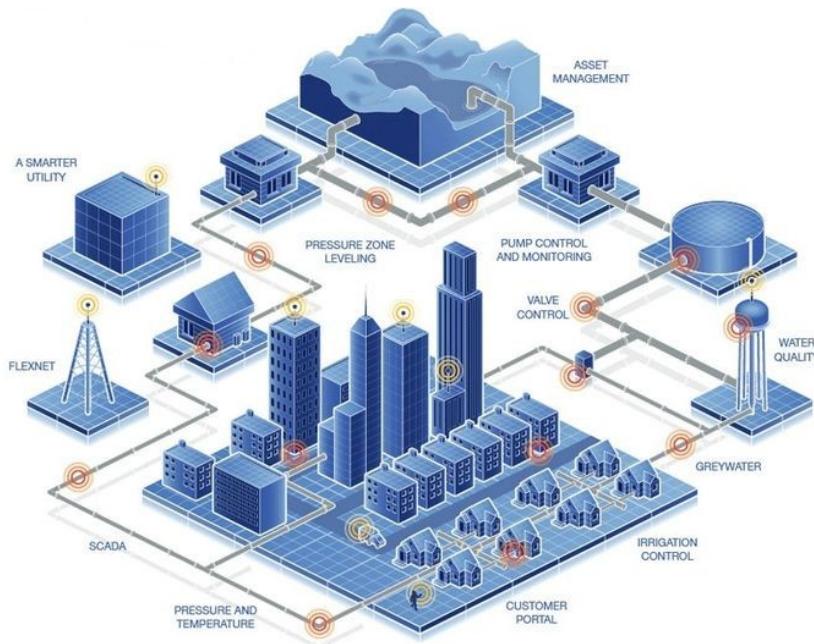


Рисунок 2 - Демонстрационная схема сетей с датчиками IoT
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.89.2>

Предлагаемый метод позволяет не только выявлять потенциально опасные участки, но и выстраивать прогноз по вероятности провала с учётом специфики местности. Это особенно важно в условиях Хабаровского края, где переувлажнённые и слабые грунты, высокая плотность застройки и наличие старых трубопроводов создают серьёзную нагрузку на подземную инфраструктуру. Систему мониторинга предлагается реализовать, в том числе, с помощью Non-metallic MultiSense [11] — это мультифункциональный кабель для мониторинга утечек на трубопроводах с возможностью одновременного измерения различных параметров (на основе DTS, DAS и DSS).

Данный кабель позволяет проводить распределённые мониторинги — температуры (DTS), акустических воздействий (DAS), деформации (DSS), в том числе, что немаловажно, протяжённых объектов.

Основные технические характеристики:

- Температурный режим: до +140°C;
- Диаметр кабеля 4,5 мм;
- Вес кабеля 20 кг/км.

Представляет собой оптическое волокно: одномодовое или многомодовое, в качестве оболочки используется полиэтилен, полипропилен, фторполимеры.

Основные результаты

Реализация описанного в предыдущем разделе подхода позволяет получить как качественные, так и количественные результаты по оценке риска провалов грунта, вызванных утечками в подземных инженерных системах. На основе интеграции сенсорных технологий с геоинформационным анализом могут быть достигнуты следующие эффекты:

4.1. Повышение точности локализации утечек

Использование беспроводных сенсорных узлов, установленных в непосредственной близости от подземных коммуникаций, позволяет фиксировать малейшие изменения давления, вибрации, влажности и акустических характеристик среды. Это даёт возможность:

- выявлять скрытые утечки, не проявляющиеся на поверхности;
- отслеживать их динамику во времени;
- определять направление миграции влаги и разуплотнённых участков;
- сопоставлять утечки с инженерно-геологическими условиями участка.

В случае имитационного эксперимента, проведённого на тестовом участке в пределах городской застройки Хабаровска, была подтверждена способность сенсоров регистрировать утечку объёмом менее 2 литров в час [3] на расстоянии до 1,5 метров от трубопровода.

4.2. Пространственная идентификация зон высокого риска

Благодаря ГИС-моделированию и расчету Sinkhole Risk Index (SRI) на основе мультифакторного анализа возможно:

- построение тепловых карт риска на уровне квартала, района или города;
- выделение зон потенциальных провалов на основе перекрёстной оценки: плотность сетей, тип грунта, влажность, история аварий;
- идентификация приоритетных участков для профилактических ремонтов и замены коммуникаций.

В пилотной модели было показано, что участки с супесчаными и техногенными грунтами при наличии сетей старше 30 лет и уровнем подземных вод ближе 1 м к поверхности имели в 5 раз более высокий интегральный риск возникновения провала.

4.3. Возможность автоматизированного мониторинга и реагирования

Система может быть интегрирована с муниципальными инженерными и аварийными службами и функционировать в автоматическом режиме:

- непрерывная передача сенсорных данных;
- оповещения при достижении критических значений параметров (например, резкое падение давления, повышение влажности на 20%);
- автоматическая генерация отчётов и карт опасных зон;
- формирование маршрутов инспекций и ремонтов на основе SRI.

4.4. Ограничения и перспективы

Несмотря на высокую эффективность подхода, возможны ограничения:

- необходимость адаптации сенсоров к агрессивным грунтовым условиям (влажность, температурные перепады);
- энергопитание беспроводных узлов в условиях отсутствия магистрального питания;
- достоверность инженерно-геологических данных для полноценной работы ГИС-модели.

В дальнейшем метод может быть расширен с использованием:

- искусственного интеллекта (AI) для анализа больших массивов сенсорных данных;
- спутниковой съёмки и LIDAR-данных для отслеживания микродеформаций поверхности;
- интеграции с BIM-моделями городской подземной инфраструктуры.

Разработана комплексная методика оценки риска провалов грунта из-за утечек в подземных коммуникациях, основанная на интеграции беспроводных сенсорных сетей (WSN) и ГИС-моделирования. Создана модель расчёта индекса риска провалов (SRI), учитывающая утечки, тип грунта, влажность, нагрузку и геодинамику. Проведено экспериментальное подтверждение возможности обнаружения утечек объёмом менее 2 л/ч на расстоянии до 1,5 м от трубопровода.

Кроме того, был предложен первый адаптированный под условия Дальнего Востока России (Хабаровский край) подход, сочетающий сенсорный мониторинг и геоинформационный анализ для прогнозирования провалов. Впервые применена концепция SRI с учётом региональных геологических и климатических особенностей. Использован мультисенсорный кабель Non-metallic MultiSense для распределённого мониторинга протяжённых объектов.

Предложенная модель является жизнеспособным и адаптивным решением для прогнозирования и предупреждения провалов грунта, особенно в условиях таких геологически уязвимых территорий, как Хабаровский край [8]. Она позволяет перейти от реактивного ремонта к проактивному управлению рисками, что особенно актуально для комплексного модернизационного подхода к подземным коммуникациям.

Практическая реализация предложенного подхода может обеспечить значительное снижение аварийности в коммунальной инфраструктуре, сокращение финансовых потерь за счёт перехода к плановому ремонту, а не ликвидации аварий, а также повысить безопасность городского населения и сохранность объектов застройки. Внедрение системы позволит создать цифровой контур «умного» мониторинга на основе IoT-устройств и геоинформационных технологий. Для успешного масштабирования модели необходимы устойчивое финансирование и нормативная поддержка, развитие локальной базы сенсорного оборудования, адаптированного к суровым климатическим условиям, а также подготовка квалифицированных специалистов в области геоинформационного анализа и цифрового мониторинга инженерных сетей.

Заключение

Провалы грунта, обусловленные утечками из подземных инженерных коммуникаций, представляют собой серьёзную угрозу для городской инфраструктуры, безопасности населения и экологической устойчивости территорий. Особенно остро эта проблема проявляется в регионах со сложными инженерно-геологическими условиями, таких как Хабаровский край, где сочетаются переувлажнённые грунты, многослойная структура подоснования и высокий износ подземных трубопроводов.

В ходе проведённого исследования была обоснована необходимость перехода от фрагментарных методов обнаружения утечек к комплексной интеграции сенсорных технологий с геоинформационным анализом. Разработанная методология предусматривает: установку беспроводных сенсорных узлов, регистрирующих параметры утечек, вибраций и влажности в реальном времени; применение георадаров и акустических датчиков в качестве дополнения к WSN-системам; формирование в ГИС-пространстве Sinkhole Risk Index (SRI) на основе анализа инженерно-геологических, техногенных и сенсорных факторов; пространственную локализацию и визуализацию зон риска, что позволяет перейти к предиктивному управлению техническим состоянием подземных сетей.

Таким образом, интеграция сенсорных систем и геоинформационного моделирования представляет собой перспективное направление для построения интеллектуальной модели управления рисками техногенных провалов. Это особенно актуально для российских регионов с уязвимой инженерной средой [7], [10] и может стать основой для разработки федеральных программ цифровизации коммунальной инфраструктуры.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Румановский И.Г., Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.89.3>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Rumanovskiy I.G., Pacific National University, Khabarovsk Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.89.3>

Список литературы / References

1. Ayadi A. A framework of monitoring water pipeline techniques based on sensors technologies / A. Ayadi, O. Ghorbel, M.S. BenSalah, M. Abid // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. — 2022. — Vol. 34, № 1. — P. 47–57. — DOI: 10.1016/j.jksuci.2019.12.003.
2. AL-Kadi T. Wireless Sensor Networks for Leakage Detection in Underground Pipelines: A Survey Paper / T. AL-Kadi, Z. AL-Tuwaijri, A. AL-Omran // Procedia Computer Science. — 2013. — Vol. 21. — P. 491–498. — DOI: 10.1016/j.procs.2013.09.067.
3. Kwak P.-J. IoT-based underground risk assessment system surrounding water pipes in Korea / P.-J. Kwak, S.-H. Park, C.-H. Choi [et al.] // Advanced Science and Technology Letters (ITCS). — 2015. — Vol. 99. — P. 23–26. — DOI: 10.14257/astl.2015.99.06.
4. Zibrov V.A. Remote ultrasound monitoring of underground water mains / V.A. Zibrov, O.V. Sokolovskaya, N.M. Zibrova, I.A. Zanina // Life Science Journal. — 2014. — Vol. 11, № 10. — P. 548–551. — URL: <http://www.lifesciencesite.com> (accessed: 01.10.2024).
5. Raza U. Wireless Underground Communications in Sewer and Stormwater Overflow Monitoring: Radio Waves through Soil and Asphalt Medium / U. Raza, A. Salam // Information. — 2020. — Vol. 11, № 2. — P. 98. — DOI: 10.3390/info11020098.
6. Ali H. A Review of Underground Pipeline Leakage and Sinkhole Monitoring Methods Based on Wireless Sensor Networking / H. Ali, J.-H. Choi // Sustainability. — 2019. — Vol. 11, № 15. — Article No. 4007. — DOI: 10.3390/su11154007.
7. Ali H. Risk Prediction of Sinkhole Occurrence for Different Subsurface Soil Profiles due to Leakage from Underground Sewer and Water Pipelines / H. Ali, J.-H. Choi // Sustainability. — 2020. — Vol. 12, № 1. — Article No. 310. — DOI: 10.3390/su12010310.
8. Кузьменко П.И. Техногенные карсты и методы их прогнозирования в условиях городской застройки / П.И. Кузьменко, В.Н. Ульянкин // Инженерная геология. — 2017. — № 2. — С. 17–25.
9. Петров С.В. Георадиолокация в инженерных изысканиях и мониторинге подземных объектов / С.В. Петров, И.В. Егоров // ГеоРиск. — 2020. — № 3. — С. 48–55.
10. Савельев А.А. Методы оценки риска провалов грунта на урбанизированных территориях / А.А. Савельев, Н.А. Морозов // Вестник ПГСГА. — 2021. — № 4 (50). — С. 132–140.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ayadi A. A framework of monitoring water pipeline techniques based on sensors technologies / A. Ayadi, O. Ghorbel, M.S. BenSalah, M. Abid // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. — 2022. — Vol. 34, № 1. — P. 47–57. — DOI: 10.1016/j.jksuci.2019.12.003.
2. AL-Kadi T. Wireless Sensor Networks for Leakage Detection in Underground Pipelines: A Survey Paper / T. AL-Kadi, Z. AL-Tuwaijri, A. AL-Omran // Procedia Computer Science. — 2013. — Vol. 21. — P. 491–498. — DOI: 10.1016/j.procs.2013.09.067.
3. Kwak P.-J. IoT-based underground risk assessment system surrounding water pipes in Korea / P.-J. Kwak, S.-H. Park, C.-H. Choi [et al.] // Advanced Science and Technology Letters (ITCS). — 2015. — Vol. 99. — P. 23–26. — DOI: 10.14257/astl.2015.99.06.
4. Zibrov V.A. Remote ultrasound monitoring of underground water mains / V.A. Zibrov, O.V. Sokolovskaya, N.M. Zibrova, I.A. Zanina // Life Science Journal. — 2014. — Vol. 11, № 10. — P. 548–551. — URL: <http://www.lifesciencesite.com> (accessed: 01.10.2024).
5. Raza U. Wireless Underground Communications in Sewer and Stormwater Overflow Monitoring: Radio Waves through Soil and Asphalt Medium / U. Raza, A. Salam // Information. — 2020. — Vol. 11, № 2. — P. 98. — DOI: 10.3390/info11020098.
6. Ali H. A Review of Underground Pipeline Leakage and Sinkhole Monitoring Methods Based on Wireless Sensor Networking / H. Ali, J.-H. Choi // Sustainability. — 2019. — Vol. 11, № 15. — Article No. 4007. — DOI: 10.3390/su11154007.
7. Ali H. Risk Prediction of Sinkhole Occurrence for Different Subsurface Soil Profiles due to Leakage from Underground Sewer and Water Pipelines / H. Ali, J.-H. Choi // Sustainability. — 2020. — Vol. 12, № 1. — Article No. 310. — DOI: 10.3390/su12010310.
8. Kuz'menko P.I. Tehnogennye karsty i metody ih prognozirovaniya v uslovijah gorodskoj zastrojki [Technogenic karst and methods of its prediction in urban development conditions] / P.I. Kuz'menko, V.N. Ul'yankin // Inzhenernaja geologija [Engineering Geology]. — 2017. — № 2. — P. 17–25. [in Russian]

9. Petrov S.V. Georadiolokacija v inzhenernyh izyskanijah i monitoringe podzemnyh ob'ektov [Ground-penetrating radar in engineering surveys and monitoring of underground objects] / S.V. Petrov, I.V. Egorov // GeoRisk. — 2020. — № 3. — P. 48–55. [in Russian]
10. Save'l'ev A.A. Metody ocenki riska provalov grunta na urbanizirovannyh territorijah [Methods for assessing the risk of ground collapses in urban areas] / A.A. Save'l'ev, N.A. Morozov // Vestnik PGSGA [Bulletin of PSGSA]. — 2021. — № 4 (50). — P. 132–140. [in Russian]