

КУН Х.-Ц.

Ключевая лаборатория интеллектуальных производственных технологий Министерства образования КНР, кафедра гражданского и экологического строительства Инженерного колледжа Университета Шаньтоу, г. Шаньтоу, Китай

ЧЖАО Л.-Ш.

Ключевая лаборатория интеллектуальных производственных технологий Министерства образования КНР, кафедра гражданского и экологического строительства Инженерного колледжа Университета Шаньтоу, г. Шаньтоу, Китай
lshzhao@stu.edu.cn

ЧЖАН Н.

Ключевая лаборатория интеллектуальных производственных технологий Министерства образования КНР, кафедра гражданского и экологического строительства Инженерного колледжа Университета Шаньтоу, г. Шаньтоу, Китай
zhangning@stu.edu.cn



ПРОРЫВ ВОДЫ В ТОННель «ШИЦЗИНШАНЬ» ВО ВРЕМЯ СТРОИТЕЛЬСТВА (г. ЧЖУХАЙ, ПРОВИНЦИЯ ГУАНДУН, КИТАЙ)

Поступила 26.01.2026

Принята к публикации 26.01.2026

Опубликована 11.06.2026

АННОТАЦИЯ

Представляем немного сокращенный адаптированный перевод статьи китайских специалистов «Прорыв воды в тоннель «Шицзиншань» во время строительства (г. Чжухай, провинция Гуандун, Китай)» (Kong et al., 2022), опубликованной в журнале Safety («Безопасность») издательством MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute – «Институт мультидисциплинарных электронных публикаций»). Данная работа находится в открытом доступе на сайте MDPI в соответствии с лицензией CC BY 4.0

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Kong et al., 2022) приведена в конце.

В публикации рассматривается прорыв воды в тоннель «Шицзиншань» в городе Чжухай (провинция Гуандун, Китай) во время его строительства (в 1,16 км от портала). В результате погибли 14 человек. Цели работы – исследование, анализ и обсуждение причин и механизма резкого водопритока в данном нетипичном случае.

Основными причинами этой катастрофы были: особые геологические условия на аварийном участке строительства; высокая водопроницаемость грунтов в зоне, соединяющей систему подземных вод с вышележащим водоемом (водохранилищем «Цзида»); воздействие интенсивных дождевых осадков.

Авторы дали важные рекомендации по предотвращению подобных аварий. Необходимо: оценить уровни риска на участках, где возможен прорыв подземных вод; выполнить комплексное геологическое прогнозирование на основе данных бурения и методов искусственного интеллекта; создать систему мониторинга в процессе проходки тоннеля; повысить навыки самозащиты у строителей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

прорыв воды в тоннель; инженерно-геологические изыскания; спасательные работы; противоаварийные меры.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Кун Х.-Ц., Чжао Л.-Ш., Чжан Н. Прорыв воды в тоннель «Шицзиншань» во время строительства (г. Чжухай, провинция Гуандун, Китай) (пер. с англ.) // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 1. С. 78–89. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-78-89.

WATER INRUSH HAZARD IN SHIJINGSHAN TUNNEL DURING CONSTRUCTION, ZHUHAI, GUANGDONG, CHINA

Received: 26.01.2026

Accepted for publication 26.01.2026

Published 11.06.2026

KONG H.-Q.

MOE Key Laboratory of Intelligence Manufacturing Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Shantou University, Shantou, China

ZHAO L.-S.

MOE Key Laboratory of Intelligence Manufacturing Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Shantou University, Shantou, China
lshzhao@stu.edu.cn

ZHANG N.

MOE Key Laboratory of Intelligence Manufacturing Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Shantou University, Shantou, China
zhangning@stu.edu.cn

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper “Water intrush hazard in Shijingshan Tunnel during construction, Zhuhai, Guangdong, China” written by Chinese specialists (Kong et al., 2022). It was published in 2022 in the journal “Safety” by the MDPI publisher (Multidisciplinary Digital Publishing Institute). It is an open access paper under the CC BY 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Kong et al., 2022), which was used for the presented translation, is given at the end.

This short communication reports on a water intrush hazard during the construction of the Shijingshan Tunnel in Zhuhai, Guangdong, China. On 15 July 2021, a water intrush accident occurred at the construction site 1.16 km away from the tunnel entrance, resulting in 14 casualties. The purpose of this study is to investigate and discuss the water intrush process in this atypical case. The principal causes of this tunneling accident include the special geological conditions at the construction site, high hydraulic conductivity in the area that connects the underground water system and the overlying water body (the Jida Reservoir), and the impact of heavy rainfall. Moreover, four significant suggestions are proposed to prevent water intrush disasters: assessing the risk level in areas prone to water intrush; getting a comprehensive geological prediction based on borehole data and artificial intelligent methods; establishing a monitoring system during the tunneling process; strengthening the self-protection skills of construction workers.

KEYWORDS:

tunnel water intrush; site investigation; rescue; countermeasures.

FOR CITATION:

Kong H.-Q., Zhao L.-S., Zhang N. Proryv vody v tunnel' "Shitszinshan" vo vremya stroitel'stva (g. Chzhukhai, provintsia Guandong, Kitai) (per. s angl.) [Water intrush hazard in Shijingshan Tunnel during construction, Zhuhai, Guangdong, China (translation from English into Russian)] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 1. S. 78–89.
DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-78-89 (in Rus.).

Введение

В последние десятилетия в Китае происходит бурное строительство инфраструктуры, в том числе таких объектов, как тоннели [1], котлованы [2], системы метрополитена [3] и др. Но при строительстве таких объектов часто случались аварии или катастрофы и возникали экологические проблемы. Например, обрушение бортов котлованов [4–6], прорывы

подземных вод в тоннели [7, 8], разрушение мостов или зданий [9], загрязнение вод [10]. Все это существенно влияет на безопасность людей. Например, 10 июня 2018 года в результате резкого водопритока в тоннель Чаоян было множество пострадавших и трое погибших [11].

Помимо факторов, связанных с человеческой деятельностью [12, 13], на безопасность зданий и сооружений в ходе урба-

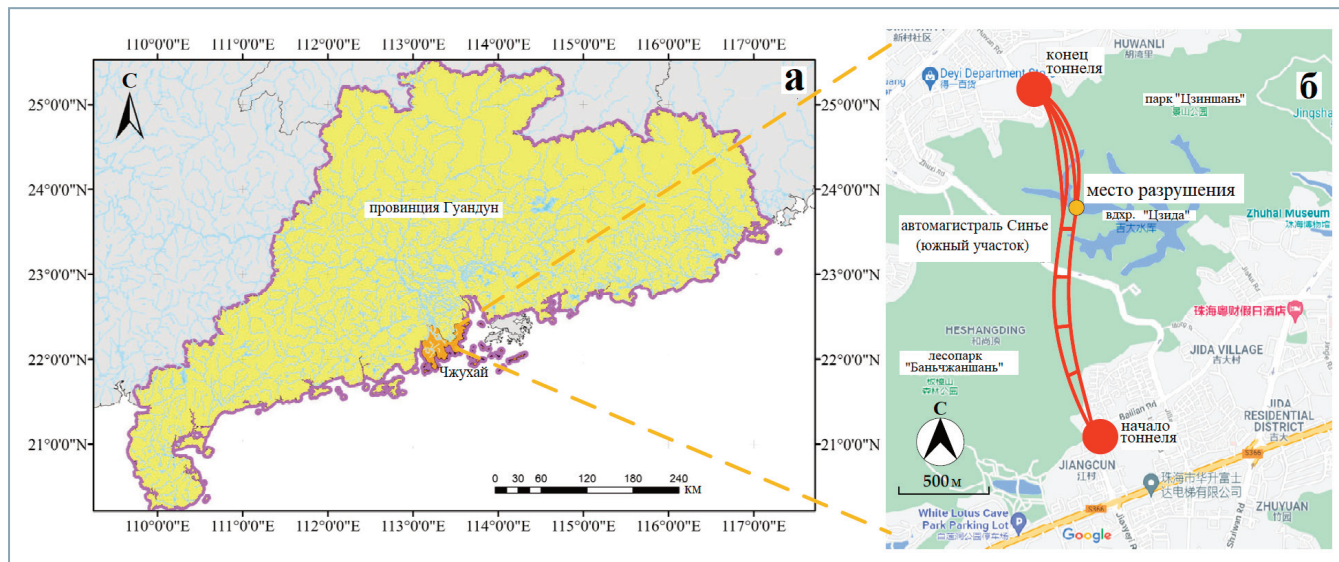


Рис. 1. Расположение обрушившегося тоннеля «Шицзиншань» в городе Чжухай (провинция Гуандун, Китай): а – гидрологическая система провинции Гуандун; б – расположение тоннеля и места его разрушения, произошедшего 15 июля 2021 года (источник картографической основы: Google Maps)

низации сильно влияют природные процессы и явления, в том числе землетрясения [14], обильные дождевые осадки и смерчи [15].

В целях предотвращения опасных ситуаций на объектах инфраструктуры многие исследователи изучали механизмы возникновения и реализации опасностей и разрабатывали различные методы оценки рисков [16, 17] и прогнозирования чрезвычайных ситуаций [18]. К числу соответствующих методов относятся: метод анализа иерархий [19]; метод выбора альтернатив на основе близости к идеальному решению (TOPSIS – Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) [20, 21]; численные методы [22]; методы искусственного интеллекта [23].

Кроме того, предпринимаются усилия по оптимизации методов строительства [24–27]. Оценка соответствующих рисков представляет собой комплексную оценку безопасности целевых инженерных объектов и связанных с ними условий окружающей среды [28]. Она очень важна для функционирования систем оповещения (или раннего предупреждения) и проведения спасательных работ при возникновении опасных ситуаций.

При реализации вышеупомянутых опасностей к наиболее серьезным негативным последствиям, как правило, приводят резкие водоприток в тоннели, поскольку такие явления нелегко выявить заранее. Поэтому необходимы соответствующие исследования. Они должны основываться на данных инженерно-геологических изысканий, на результатах анализа условий окружающей среды и на учете внутригодовой динамики метеоусловий.

В данной краткой публикации рассматривается прорыв воды в строившийся тоннель «Шицзиншань» в городе Чжухай (про-

винция Гуандун, Китай) [29, 30]. Сначала представим основную информацию о проекте строительства этого тоннеля. Затем опишем ситуацию, связанную с резким водоприток в него и последующими спасательными работами, а также проанализируем факторы, влияющие на возникновение и реализацию данной опасности. И в заключение подчеркнем, что для участков с повышенной вероятностью водопритока необходимы эффективная система мониторинга и комплексная оценка риска.

Исходные сведения о проекте

На рисунке 1 представлена карта, на которой отмечено место, где обрушился тоннель. В данной публикации рассматривается участок южной части скоростной автомагистрали Синье (Xingye Expressway), который находится под северной частью горы Баньчаншань в городе Чжухай в китайской провинции Гуандун (рис. 1, а). Этот участок включает два тоннеля (восточный и западный), которые начинаются на пересечении проспекта Цзючжоу (Jiuzhou Avenue) и 1-й дороги Цзянье (Jianye 1st Road) с южной стороны указанной горы и заканчиваются в рабочем стволе на ее северной стороне при общей протяженности около 2,5 км (рис. 1, б). Длина западного и восточного тоннелей составляет 2445,9 и 2434,4 м соответственно. Их проектная высота – 11 м, ширина – 15 м. Для их проходки применялся новый австрийский метод тоннелестроения (NATM – New Austrian Tunnelling Method) с использованием такого подхода, как ступенчатая разработка забоя. Система крепления включала: опережающую крепь из труб $\Phi 42 \times 4$ (с наружным диаметром 42 мм и толщиной стенки 4 мм) с инъецированием; анкерные крепления; стальные арки; инъекционный бетон.

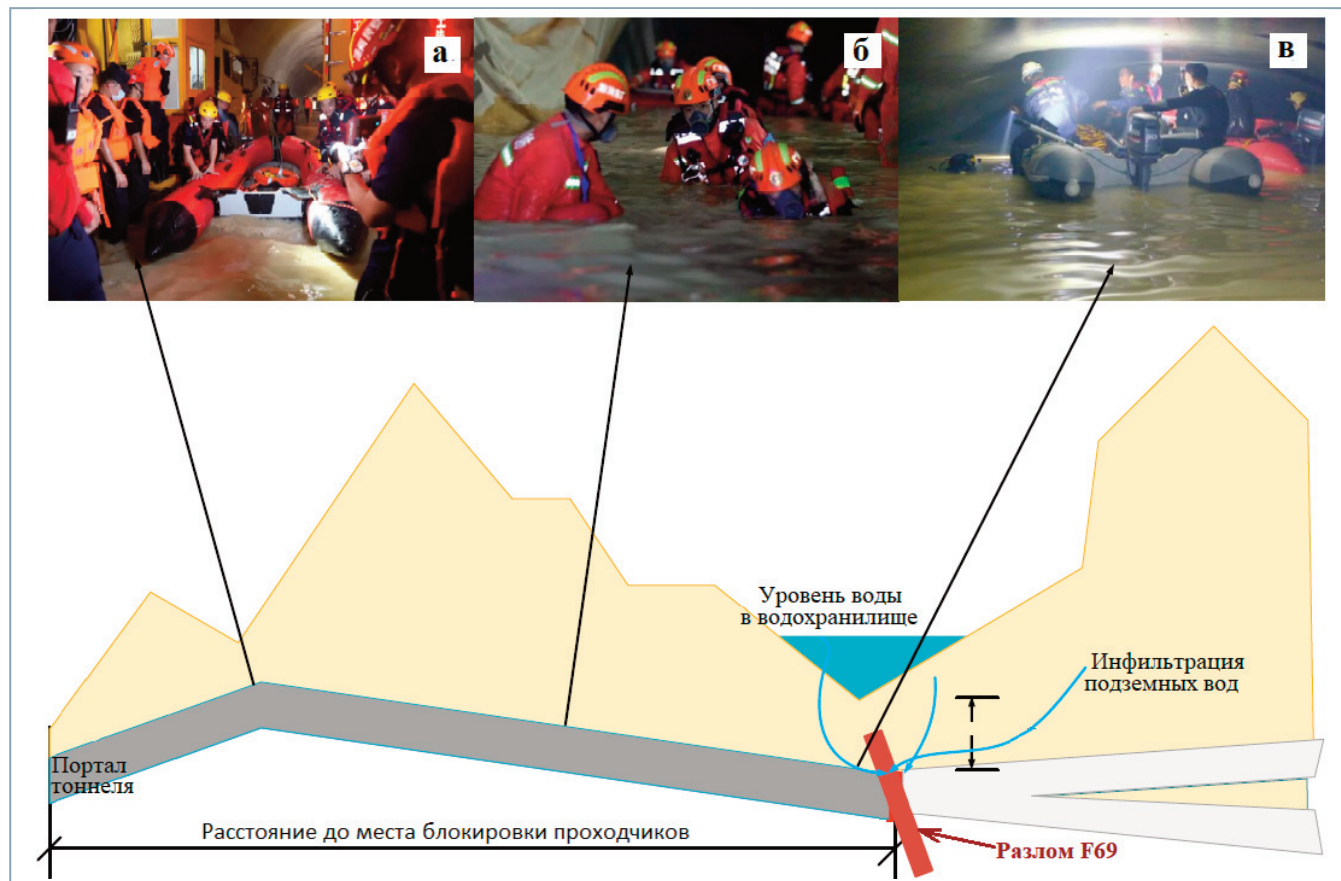


Рис. 2. Уровни воды в тоннеле после аварийного водопритока: а – минимальный уровень воды в месте старта спасательного катамарана (источник фото: https://www.guancha.cn/politics/2021_07_17_598831_s.shtml); б – вода в средней части тоннеля, которая была спасателям по пояс (источник фото: https://www.xianjichina.com/news/details_275025.html); в – место с максимальным уровнем воды в тоннеле при проведении спасательных работ, в котором наблюдался недостаток кислорода (источник фото: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13726501)

Прорыв воды

Катастрофический прорыв воды произошел 15 июля 2021 года в 3:30 в результате обрушения свода восточного тоннеля. До этого, 14 июля в 18:55, при проходке данного тоннеля были завершены буровзрывные работы. Последующая очистка забоя от взорванной породы продолжалась около 9 часов и была окончена 15 июля в 2:35. Однако помимо опережающей трубной крепи без инъецирования какие-либо другие элементы крепления не были установлены. И в 3:28 произошло обрушение значительного количества песка и камня со свода восточного тоннеля. А спустя две минуты участок свода, не имевший крепления, обрушился полностью, после чего в тоннель хлынула вода. Затем вода устремилась в западный тоннель через соединительный ход. На рисунке 2 показан уровень воды в тоннеле после прорыва. В западном тоннеле на расстоянии 1160 м от портала оказались заблокированными 14 человек (см. рис. 2).

Исследования выявили основные причины катастрофы. Участок тоннеля под водохранилищем «Цзида» (Jida Reservoir) прошел через глубокую зону выветривания с обильным обвод-

нением. Свод восточного тоннеля обрушился, приведя к затоплению, из-за неправильного метода строительства и задержки с установкой системы крепления. При этом вода поступила в западный тоннель, что привело к гибели проходчиков.

Сложность гидрогеологических условий и особенности тоннелей в аварийной зоне вызвали следующие трудности при проведении спасательных работ.

1. Участок со сложными гидрогеологическими условиями, на котором произошло обрушение тоннеля с затоплением, характеризуется холмистым рельефом дневной поверхности. Основными залегающими там породами являются граниты и выветрелые грунты. В отдельных зонах гранитов развита трещиноватость. В прилегающем районе выявлены разломы Хувань и Цзида, приразломные зоны которых взаимодействовали с участком тоннельного строительства. Под влиянием окружающих основных и вторичных разломов трещиноватость грунтового массива в аварийной зоне достигла высокой степени, со значительной раздробленностью пород.

2. Между аварийным тоннелем и водохранилищем «Цзида» присутствует сильная гидравлическая связь. В течение полутора часов после обрушения свода сооружения уровень

воды в водоеме снизился на 1,9 м. По оценкам, из водохранилища в тоннели поступило около $2,2 \times 10^5$ м³ воды. Поэтому на начальном этапе катастрофы интенсивный водоприток существенно осложнил работы по осушению тоннелей. Кроме того, под воздействием проходки и аварийного затопления гидравлическая связь между водохранилищем и тоннелем еще больше усилилась, что привело к дополнительному увеличению притока воды и к дальнейшему усложнению водоотливных работ.

3. Строители оказались заблокированными на нисходящем участке тоннеля. Уклон тоннеля, равный 3%, привел к накоплению грязевых отложений и других наносов на этом участке, что осложнило доступ к нему для водолазов и подводных роботов. Чем больше накапливалось грязи в воде, тем проблематичнее становилось проведение спасательных работ.

Аварийно-спасательные работы

1. В верхнем бьефе водохранилища была возведена водонепроницаемая перемычка, разделившая водоем на две части и прервавшая связь между его котловиной и источником его питания. Благодаря этому внешний приток воды шел уже не из всего водохранилища, а только из небольшого пруда. Далее вода, скопившаяся над местом обрушения тоннеля, была дренирована.

Эти меры позволили предотвратить поступление поверхностных вод из водохранилища «Цзида» в подземное сооружение. Объем дренажного оборудования непрерывно увеличивался. Использовали: 10 грязевых насосов, генераторы мощностью 7500 кВт, диагональный насос (смешанного потока) мощностью 175 кВт, водоотливные насосы (275 кВт), погружные насосы (330 кВт), канализационные насосы (390 кВт), 10 автоцистерн. Помимо наружного дренажа откачка проводилась также внутри тоннеля (рис. 3). Чтобы решить проблему чрезмерной концентрации угарного газа внутри сооружения и улучшить условия проведения спасательных работ, в дополнение к восьми уже функционировавшим осевым вентиляторам были введены в действие восемь струйных вентиляторов.

2. Целостность скальных пород уже была сильно нарушена, поэтому в ходе спасательной операции потребовалось провести усиленную инъекционную цементацию грунтового массива для обеспечения безопасности людей в зоне ведения работ. Нижняя часть котловины водохранилища, из которой происходила инфильтрация воды в тоннель, после откачки из нее жидкости была засыпана грунтом. Затем путем планировки и уплотнения этого грунта была подготовлена рабочая площадка для размещения механизированного оборудования



Рис. 3. Спасатели раскладывают дренажное оборудование (источник фото: https://www.guancha.cn/politics/2021_07_17_598831_s.shtml)



Рис. 4. Участок проведения спасательных работ (источник фото: https://www.guancha.cn/politics/2021_07_17_598831_s.shtml)

(на рисунке 4 показан участок водохранилища над тоннелем в процессе аварийно-спасательных работ).

Затем с помощью универсальных бурильно-инъекционных установок пробурили скважины и применили технологию нагнетания двухкомпонентного раствора для инъекционного армирования насыпного грунта и забоя тоннеля. Такой раствор затвердевает в течение 30–50 секунд, что позволяет быстро превратить исходно рыхлый грунт в плотную монолитную структуру, эффективно блокирующую приток воды в тоннель из водохранилища и подземных трещин.

В этих работах принимали участие более 110 человек и было задействовано 20 комплектов оборудования. Засыпка отгороженного водонепроницаемой перемычкой участка котловины водохранилища, расположенного над сводом аварийного тоннеля, была завершена 16 июля к 15:00. По со-

стоянию на 9 часов утра 17 июля на площадку было доставлено 90 т цемента и 20 т силиката натрия, введено в работу 12 комплексных бурильно-инъекционных установок.

3. Главной целью Гуанчжоуского аварийно-спасательного управления Министерства транспорта КНР было спасение людей с привлечением всех возможных сил. Для участия в этой операции на место катастрофы срочно прибыли 8 водолазов от Аварийно-спасательного управления Южно-Китайского моря (Наньхайского аварийно-спасательного управления Министерства транспорта КНР), 6 водолазов от Гуанчжоуского аварийно-спасательного управления и 3 эксперта по аварийно-спасательным работам. По состоянию на 9 часов утра 19 июля 4 смены водолазов провели поисково-спасательные работы общей продолжительностью 16 часов, обследовав более 900 м затопленного тоннеля. На рисунке 5 показано начало выполнения этих работ.

4. Проводился мониторинг безопасности конструкций тоннеля и присутствия в нем токсичных газов. Для предотвращения возникновения вторичных катастроф постоянно усиливалось отслеживание гидрологических условий на дневной поверхности в режиме реального времени, особенно для горы, водохранилища, других водных объектов и насыпного грунта (рис. 6). Велся мониторинг возникновения протечек в тоннеле, наличия в нем опасных газов, осадок поверхности грунта с регулярным оповещением через каждые 30 минут о ситуации внутри и снаружи для обеспечения безопасности спасателей.

К сожалению, 22 июля 2021 года, после нескольких дней непрерывных поисково-спасательных работ, было подтверждено, что все 14 человек, оказавшихся в ловушке, погибли.

Геологические условия территории вдоль трассы тоннеля

Тоннель «Шицзиншань» начинается вблизи деревни Байлянь и пересекает под землей весь лесопарк горы Баньчжаншань с юга на север. Он был построен с использованием нового австрийского метода тоннелестроения (NATM), который применяется там, где преобладают очень твердые породы с прочностью более 100 МПа. Проходка через твердые грунты обычно сопровождается подрывными работами с разрушением пород непосредственно перед выемкой.

На рисунке 7 схематично показан геологический разрез рассматриваемой территории.

Проходка тоннеля «Шицзиншань» сквозь гору Баньчжаншань велась преимущественно в сильно выветрелых гранитах (см. рис. 7), причем расстояние между его сводом и дном водохранилища составляло примерно 19 м. Это представляло основной риск для подземного сооружения. Однако из-за от-



Рис. 5. Спасатели спускают подводного робота с катамарана (источник фото: https://www.xianjichina.com/news/details_275025.html)



Рис. 6. Система мониторинга и управления аварийно-спасательными работами (справа) (источник фото: https://www.guancha.cn/politics/2021_07_17_598831_s.shtml)

сутствия инженерно-геологических скважин до катастрофы упомянутый грунт был грубо оценен как гранит средней степени выветрелости, обладающий достаточной прочностью для выдерживания нагрузки на тоннель от залегающих выше пород при использовании метода ступенчатой разработки забоя.

При детальном же инженерно-геологическом изыскании после катастрофы было установлено, что в действительности вокруг места прорыва воды залегал сильно выветрелый гранит с развитой трещиноватостью. И его прочность была значительно снижена под воздействием подземных вод.

Таким образом, неточная оценка геологических условий была одной из основных причин аварии. К тому же в описанных условиях применение нового австрийского метода тоннелестроения (NATM) несло дополнительный риск обрушения.

При проходке тоннеля в твердых породах буровзрывные работы могут вызывать неустойчивость его забоя и даже приводить к прорывам воды, которые чаще всего происходят в зонах, где

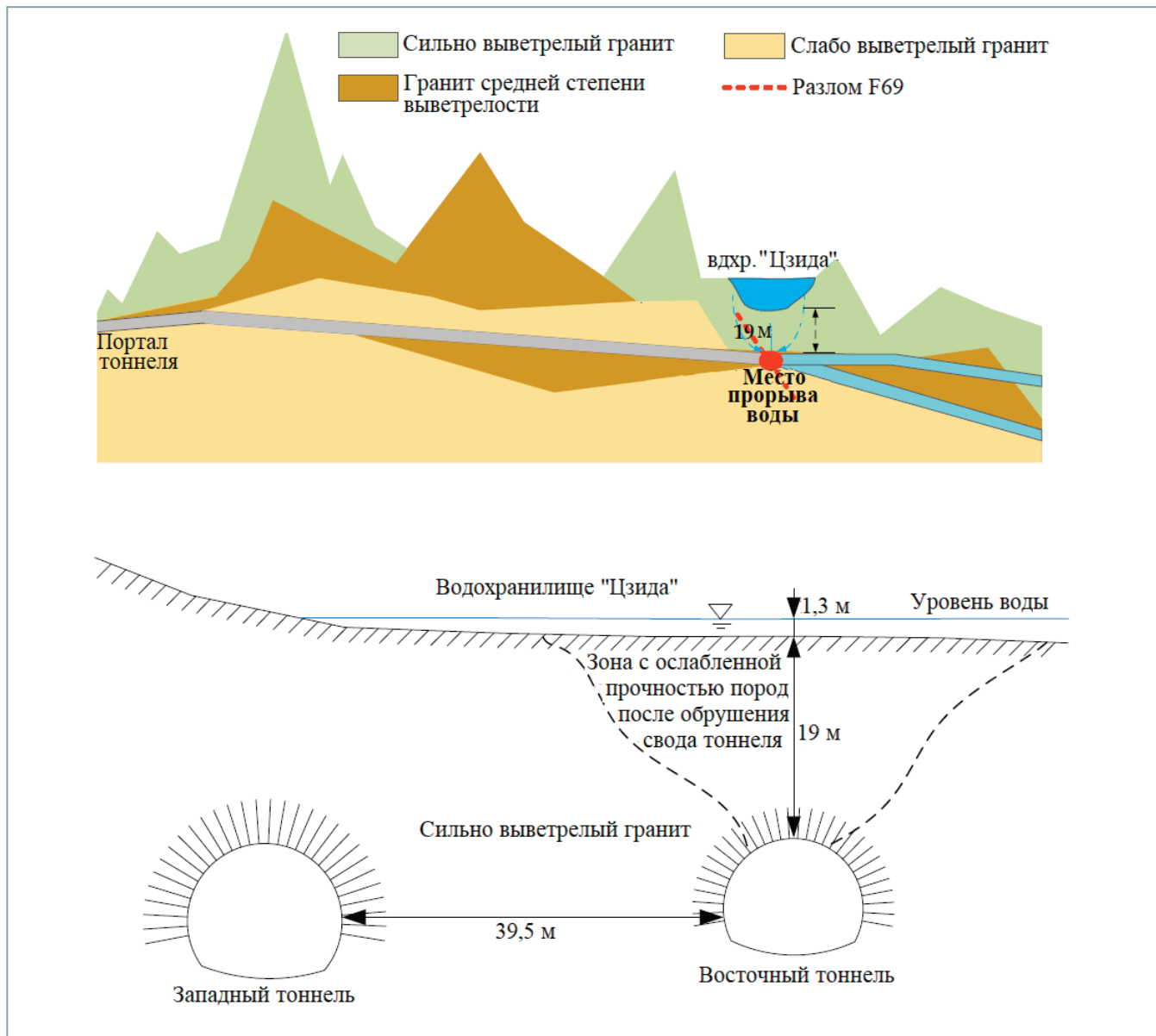


Рис. 7. Схематический геологический разрез рассматриваемой территории

грунты характеризуются трещиноватостью или наличием разломов. На рисунке 8 показано пересечение трассой тоннеля «Шицзиншань» разлома F69 вблизи водохранилища «Цзида».

Наличие разлома под названием F69 (согласно геологической карте города Чжухай), пересекающего горы Баньчжан, было выявлено при инженерно-геологических изысканиях, выполненных для строительства другого тоннеля под горой Баньчжаншань, носящего то же название, что и гора (см. рис. 8). Этот разлом простирается в направлении с юго-запада на северо-восток. Вероятность пересечения проектируемой трассой тоннеля «Шицзиншань» с разломом F69 в месте, расположенном под водохранилищем «Цзида», была высока. В случае подтверждения этой оценки данное место было бы наиболее опасным участком тоннеля.

Кроме того, снижение прочности пород в зоне разлома могло значительно увеличить неустойчивость забоя тоннеля.

Поэтому при буровзрывной разработке забоя без надлежащего предварительного крепления тоннель мог обрушиться в любой момент.

Инженерно-геологический разрез в указанном месте сложен насыпным грунтом (занимающим верхнюю часть и имеющим мощность около 2–6 м), гравийно-песчаным грунтом, полностью выветрелым гранитом, сильно выветрелым гранитом, гранитом средней степени выветрелости и слабо выветрелым гранитом. Оцененные значения геотехнических параметров для этих слоев приведены в таблице.

Механизм прорыва воды

В рассматриваемом случае основным источником риска являлось водохранилище «Цзида». К возникновению прорыва воды в тоннель могла привести высокая водопроницаемость

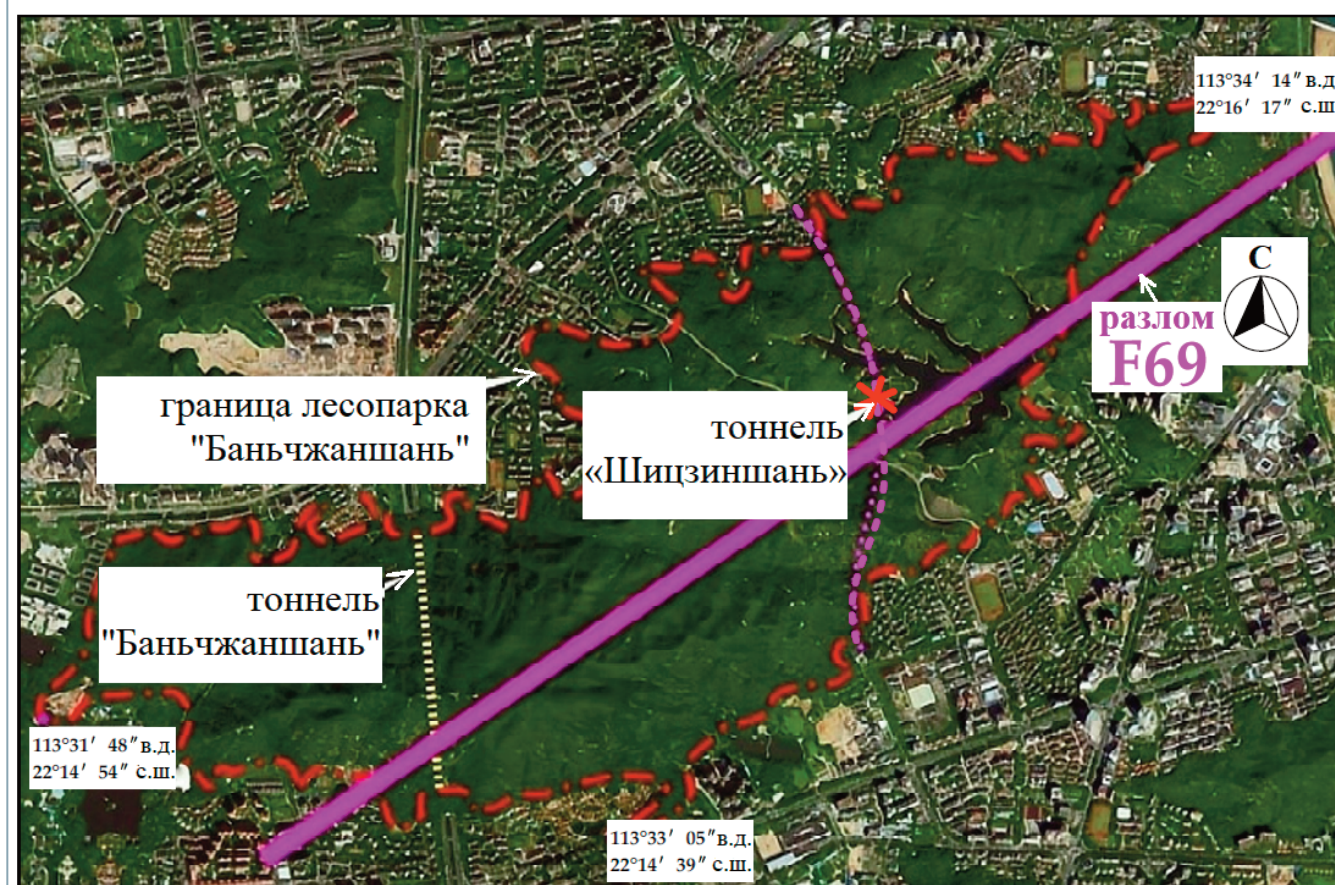


Рис. 8. Место пересечения тоннеля «Шецзиншань» с разломом F69 вблизи водохранилища «Цзида» (источник изображения: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/390890982>)

Таблица. Оцененные значения геотехнических параметров слоев грунта, принятые при проектировании и строительстве (источник: <https://www.doc88.com/p-19259446047410.html?r=1>, accessed on 18 May 2020)

Тип грунта	Несущая способность f_{a0} , кПа	Природный удельный вес γ , кН/м ³	Влажность w , %	Удельное сцепление C , кПа	Угол внутреннего трения φ , °	Компрессионный (одеметрический) модуль деформации (в интервале давления 0,1–0,2 МПа) E_{s1-2} , МПа	Начальный модуль деформации E_0 , МПа
Насыпной грунт	90	18,3	25,0	22,0	15,1	4,15	-
Гравийно-песчаный грунт	170	18,1	12,6	-	41,7	-	-
Полностью выветрелый гранит	300	19,0	22,5	21,2	25,4	5,02	118,5
Сильно выветрелый гранит	600	-	-	-	-	-	234,6
Гранит средней степени выветрелости	1500	Предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии $f_{pk} = 24,85$ МПа					
Слабо выветрелый гранит	2800	Предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии $f_{pk} = 49,12$ МПа					

зоны разлома. После обрушения вмещающих грунтов вода из водохранилища могла быстро проникнуть в тоннель через зону повышенной трещиноватости, связанную с разломом, и в итоге вызвать резкий водоприток (согласно данным изысканий, выполненных после катастрофы, максимальный исходный уровень воды в водохранилище мог достигать 20 м). Обрушение забоя восточного тоннеля могло привести к образованию воронкообразной зоны ослабления прочности пород между сводом подземного сооружения и дном водохранилища, что скорее всего и обусловило интенсивный приток туда воды из водоема (см. рис. 7). Вода могла сначала прорваться в правый тоннель и затем через поперечный соединительный ход попасть в левый тоннель. Кроме того, продолжался приток внутрь сооружения за счет фильтрации подземных вод.

Поскольку вода очень быстро поступала в тоннель в основном из водохранилища, для оценки фактического коэффициента фильтрации грунта целесообразно использовать закон Дарси, который выражается следующим образом:

$$Q = KA \frac{\Delta h}{L},$$

где Q – интенсивность (расход, дебит) водопритока, м³/с; K – коэффициент фильтрации грунта, м/с; A – площадь поперечного сечения зоны прорыва, м²; Δh – потеря напора (разность напоров), м, на участке фильтрации длиной L , м.

В данном случае длина пути фильтрации L оценивается как минимальное расстояние между дном водохранилища и сводом тоннеля, равное 19 м. Принимается максимальное значение перепада напоров Δh , равное 22,2 м. Тогда максимальный градиент напора $J = \Delta h / L$ (гидравлический градиент, перепада напора на единицу длины) составляет: $22,2 / 19 = 1,17$.

Во время интенсивного водопритока в тоннель уровень воды в водохранилище будет снижаться, а уровень воды в тоннеле – повышаться. Разность напоров сохранится, но постепенно снизится. Поскольку ширина незакрепленного свода сооружения составляет 1,8 м, а оцененная длина окружности поперечного сечения тоннеля – около 15 м, площадь поперечного сечения зоны прорыва A составит около 27 м².

Согласно данным полевых измерений, в течение полутора часов из водохранилища ушло $2,2 \times 10^5$ м³ воды, что соответствует среднему расходу водопритока $Q \approx 40,7$ м³/с. Соответственно, коэффициент фильтрации грунта K , оцененный путем приведенного расчета, составляет 1,29 м/с, что существенно превышает эмпирические значения для выветрелого гранита (от $3,3 \times 10^{-6}$ до $5,2 \times 10^{-5}$ м/с) или гравия (от 3×10^{-4} до 3×10^{-2} м/с). Таким образом, чрезмерно высокая величина K подтвердила наличие непосредственной гидравлической связи между водохранилищем и тоннелем, что и было одной из основных причин катастрофы.

Интенсивные дождевые осадки

Город Чжухай расположен к югу от тропика Рака и находится в зоне субтропического морского муссонного климата, для которого характерно обилие солнечного света и осадков. Этот район часто оказывается под влиянием южных субтропических муссонов и гроз. Максимальное годовое количество осадков там составило 2873,9 мм (1973 г.), минимальное – 1200,9 мм (1963 г.), среднемноголетнее – 1950,7 мм. Максимальное суточное количество осадков составило 393,7 мм (12 июня 1966 г.). Самый продолжительный период непрерывных дождей длился 18 суток (в июле 1968 г.) при общем количестве осадков 378,3 мм. Распределение в течение года было неравномерным: на летний период (с апреля по сентябрь) приходилось 80% годового объема осадков [31].

Дожди рассматривались как еще один значимый фактор, способствовавший прорыву воды в тоннель. В июле 2021 года среднемесячное количество осадков в Чжухае достигло своего пика. Более того, 7 июля 2021 года в городе непрерывно шел дождь, а 14 июля 2021 года там был грозовой ливень. Продолжительные осадки были одним из ключевых факторов, спровоцировавших водоприток, поскольку они привели к повышению уровней поверхностных вод и водохранилища «Цзида» – важных источников подпитки подземных вод.

Таким образом, неблагоприятная ситуация была усугублена сочетанием таких факторов, как затяжные дожди и продолжающиеся работы по проходке тоннеля.

На рисунке 9 схематично представлены причинно-следственные связи, которые привели к прорыву воды в тоннель.

Обсуждение и рекомендации

Создание тоннелей – оптимальный выбор при проектировании железных дорог или автомагистралей в горных районах, позволяющий сокращать расстояния и избегать больших уклонов. Однако из-за недостаточных знаний о геологических условиях во время строительства различных тоннелей реализовывались многочисленные геологические опасности и происходили аварии и катастрофы, в том числе с гибелью людей. Например, на рассмотренном в данной статье участке тоннеля с неблагоприятными геологическими условиями в 2021 году произошла трагедия.

Подобные события в последние десятилетия приводили к гибели людей и к серьезному материальному ущербу. Опасность прорыва воды в тоннель может привести к катастрофе, и с этим очень трудно иметь дело. Чтобы уменьшить риск реализации такой опасности, надо должным образом исследовать геологические условия и источники воды при изысканиях для проектирования и строительства.



Рис. 9. Факторы, спровоцировавшие прорыв воды в тоннель

Развитие интенсивного водопритока при строительстве тоннелей является сложным процессом – и полное понимание механизмов прорыва воды получить трудно. Существуют способствующие его возникновению факторы, такие как изменение напряженно-деформированного состояния грунтов во время проходки, развитие трещиноватости пород, изменения окружающей среды и др. Из-за комбинированного воздействия указанных факторов традиционные эмпирические методы прогнозирования резкого водопритока теперь не подходят. В решении задач, в которых рассматривается совокупное влияние множества факторов, могут помочь методы искусственного интеллекта (ИИ). Существенно облегчить выявление механизмов возникновения прорывов воды при строительстве тоннелей может совокупное использование геоинформационных систем (ГИС) и ИИ.

Необходимо тщательно изучить инженерно-геологические условия района трассы будущего тоннеля. На практике обычно применяют бурение скважин. Однако строителям приходится находить баланс между стоимостью бурения и точностью инженерно-геологических данных. И в таких случаях очень не просто прогнозировать изменения геологических условий на основе ограниченности данных по скважинам. Хорошим решением является сочетание новейших методов, таких как метод переходных (электромагнитных) процессов и метод

георадиолокации (георадарный), с традиционным бурением скважин, что позволяет очень точно и достоверно оценить геологические условия.

Для предотвращения или снижения ущерба, вызванного прорывами воды в тоннели, необходимо создавать системы мониторинга. Надежные методы мониторинга должны быть экономичными, удобными в использовании и подходящими для применения в сложных геологических условиях, например в карстующихся грунтовых массивах. В настоящее время в геотехническом строительстве получили широкое распространение инновационные волоконно-оптические датчики, которые позволяют эффективно измерять изменения напряжений, смещения, давление воды и другие параметры. Этот тип технологий мониторинга особенно хорошо подходит для проектов строительства тоннелей в условиях воздействия множества факторов. На основе собранных данных и алгоритмов ИИ центр мониторинга может предупреждать или оповещать о возникновении аномальных ситуаций и выдавать инструкции.

Может быть рассмотрено частичное применение щитовой проходки тоннеля. Проходческий щит, являясь мощной временной крепью, способен противостоять внешнему давлению подземных вод и давлению со стороны забоя или подошвы. Такой тип проходки протяженных тоннелей глубокого зало-

жения в слабых водоносных слоях часто имеет преимущества с технической и экономической точек зрения и соответствует условиям реализации рассмотренного в статье проекта на опасном участке.

Заключение

15 июля 2021 года в городе Чжухай (провинция Гуандун, Китай) произошел катастрофический прорыв воды в тоннель при его проходке. Это случилось под водохранилищем «Цзида», что значительно осложнило спасательные работы и привело к гибели 14 человек.

Данная катастрофа была спровоцирована совокупным воздействием следующих факторов: высоким коэффициентом фильтрации (гидравлической проводимостью, водопроницаемостью) грунтов на аварийном участке; наличием разломов в этом районе (прежде всего разлома F69); сильными дождями перед рассматриваемым событием; инфильтрацией воды из расположенного над тоннелем водохранилища.

Необходимо проводить оценку рисков в районах, где возможны прорывы воды в тоннели во время их строительства.

Для прогнозирования возможных техногенных аварий и катастроф следует применять эффективные методы мониторинга *in situ*. Кроме того, важно исследовать геологические условия вдоль трассы тоннеля с использованием методов искусственного интеллекта на основе ограниченных данных бурения. Повысить эффективность отслеживания возникновения подобных аварий и успешность поисково-спасательных работ могут методы ИИ. Они, например, помогают выполнять мониторинг очагов фильтрации воды и деформаций забоя и обнаженной поверхности выработки на начальном этапе проходки (до создания окончательной обделки тоннеля), что позволяет своевременно оповещать руководство о необходимости принятия противоаварийных мер. Кроме того, технологии ИИ позволяют обнаруживать и идентифицировать людей в ходе поисково-спасательных работ, что способствует сохранению жизней. **и**

Данное исследование было выполнено при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 4210020169) и Фонда поддержки исследований для новых сотрудников Университета Шаньтоу (грант № NTF21008-2021).

Источник для перевода (Source for the translation)

Kong H.-Q., Zhao L.-S., Zhang N. Water inrush hazard in Shijingshan Tunnel during construction, Zhuhai, Guangdong, China // Safety. 2022. Vol. 8. № 1. Article 7. <https://doi.org/10.3390/safety8010007>. URL: <https://www.mdpi.com/2313-576X/8/1/7>.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи (References used by the authors of the translated article)

1. Lyu H.M., Shen S.L., Zhou A., Chen K.L. Calculation of pressure on the shallow-buried twin-tunnel in layered strata // Tunn. Undergr. Space Technol. 2020. Vol. 103. Article 103465.
2. Lin S.S., Shen S.L., Zhou A., Xu Y.S. Risk assessment and management of excavation system based on fuzzy set theory and machine learning methods // Autom. Constr. 2021. Vol. 122. Article 103490.
3. Lyu H.M., Zhou W.H., Shen S.L., Zhou A. Inundation risk assessment of metro system using AHP and TFN-AHP in Shenzhen // Sustain. Cities Soc. 2020. Vol. 56. Article 102103.
4. Lin S.S., Shen S.L., Zhou A., Xu Y.S. Novel model for risk identification during karst excavation // Reliab. Eng. Sys. Saf. 2021. Vol. 209. Article 107435.
5. Atangana Njock P.G., Shen S.L., Zhou A., Modoni G. Artificial neural network optimized by differential evolution for predicting diameters of jet grouted columns // J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2021. Vol. 13. P. 1500–1512.
6. Chin Y.T., Chen J. Foundation pit collapse on 8 June 2019 in Nanning, China: a brief report. Safety. 2019. Vol. 5. № 4. Article 68.
7. Yu C., Zhou A., Chen J., Arulrajah A., Horpibulsuk S. Analysis of a tunnel failure caused by leakage of the shield tail seal system // Undergr. Space. 2020. Vol. 5. P. 105–114.
8. Shen S.L., Wu H.N., Cui Y.J., Yin Z.Y. Long-term settlement behavior of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai // Tunn. Undergr. Space Technol. 2014. Vol. 40. P. 309–323.
9. Chai J.C., Shen S.L., Ding W.Q., Zhu H.H., Cater J.P. Numerical investigation of the failure of a building in Shanghai, China // Comput. Geotech. 2014. Vol. 55. P. 482–493.

10. Kardani N., Zhou A., Nazem M., Shen S.L. Improved prediction of slope stability using a hybrid stacking ensemble method based on finite element analysis and field data // J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2021. Vol. 13. P. 188–201.
11. Zhang N., Zheng Q., Elbaz K., Xu Y.S. Water Inrush Hazards in the Chaoyang Tunnel, Guizhou, China: a Preliminary Investigation // Water. 2020. Vol. 12. Article 1083.
12. Shen S.L., Lyu H.M., Zhou A., Lu L.H., Li G., Hu B.B. Automatic control of groundwater balance to combat dewatering during construction of a metro system // Autom. Constr. 2021. Vol. 123. Article 103536.
13. Xie Z.F., Shen S.L., Arulrajah A., Horpibulsuk S. Environmentally sustainable groundwater control during dewatering with barriers: A case study in Shanghai // Undergr. Space 2020. Vol. 6. P. 12–23.
14. Lyu H.M., Shen S.L., Yang J., Zhou A. Risk assessment of earthquake-triggered geohazards surrounding Wenchuan, China // Nat. Hazards Rev. 2020. Vol. 21. Article 05020007.
15. Zheng H., Wang L.W. Analysis on the climatic characteristics and impact of Rainstorm in Zhuhai // Guangdong Meteorol. 2020. Vol. 36. P. 19–23.
16. Zheng Q., Lyu H.M., Zhou A., Shen S.L. Risk assessment of geohazards along Cheng-Kun railway using fuzzy AHP incorporated into GIS // Geomat. Nat. Hazards Risk. 2021. Vol. 12. P. 1508–1531.
17. Lyu H.M., Shen S.L., Zhou A., Yang J. Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP // Sci. Total Environ. 2020. Vol. 717. Article 135310.
18. Wu H.N., Shen S.L., Chen R.P., Zhou A. Three-dimensional numerical modelling on localized leakage in segmental lining of shield tunnels // Comput. Geotech. 2020. Vol. 122. Article 103549.
19. Lyu H.M., Sun W.J., Shen S.L., Zhou A. Risk assessment using a new consulting process in fuzzy AHP // J. Constr. Eng. Manag. 2020. Vol. 146. Article 04019112.
20. Elbaz K., Shen S.L., Zhou A., Yin Z.Y., Lyu H.M. Prediction of disc cutter life during shield tunneling with AI via the incorporation of a genetic algorithm into a GMDH-type neural network // Engineering. 2021. Vol. 7. P. 238–251.
21. Lin S.S., Shen S.L., Zhou A., Xu Y.S. Approach based on TOPSIS and Monte Carlo simulation methods to evaluate lake eutrophication levels // Water Res. 2020. Vol. 187. Article 116437.
22. Yin Z.Y., Jin Y.F., Shen J.S., Hicher P.Y. Optimization techniques for identifying soil parameters in geotechnical engineering: comparative study and enhancement // Numer. Anal. Methods Geomech. 2018. Vol. 42. P. 70–94.
23. Lyu H.M., Shen S.L., Zhou A.N., Yang J. Perspectives for flood risk assessment and management for mega-city metro system // Tunn. Undergr. Space Technol. 2019. Vol. 84. P. 31–44.
24. Wang Z.F., Shen S.L., Modoni G., Zhou A. Excess pore water pressure caused by the installation of jet grouting columns in clay // Comput. Geotech. 2020. 125. Article 103667.
25. Shen S.L., Wang Z.F., Cheng W.C. Estimation of lateral displacement induced by jet grouting in clayey soils // Geotech. ICE. 2017. Vol. 67. № 7. P. 621–630.
26. Wang Z.F., Shen S.L., Modoni G. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: theoretical model and application // Comput. Geotech. 2019. Vol. 111. P. 222–228.
27. Yan T., Shen S.L., Zhou A., Lyu H.M. Construction efficiency during shield tunnelling in soft deposit of Tianjin // Tunn. Undergr. Space Technol. 2021. Vol. 112. Article 103917.
28. Shen S.L., Atangana Njock P.G., Zhou A., Lyu H.M. Dynamic prediction of jet grouted column diameter in soft soil using Bi-LSTM deep learning // Acta Geotech. 2021. Vol. 16. P. 303–315.
29. Chen J.H. Progress of Zhuhai Tunnel Flooding Accident: 14 People Trapped 1160 Meters Away from the Entrance. URL: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13594591. The last accessed date: 15 July 2021.
30. Chai M.Y. Cofferdam Has Been Used to Block the Permeable Point of the Tunnel Seepage Accident, and the Rescue Is in Progress. URL: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13594373. The last accessed date: 15 July 2021.
31. Li X.H., Wang D. Characteristics of precipitation of Zhuhai since 1962 to 2010 // Guangdong Meteorol. 2012. Vol. 34. P. 35–37.

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо» выходит
 в формате *PDF. 4 выпуска в 2026 году.

WWW.GEOINFO.RU

