

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ОСУШЕНИЯ ГЛУБОКОГО КОТЛОВАНА НА ОСАДКИ ПОВЕРХНОСТИ

ЛИ С.

Факультет гражданского строительства
Хэфэйского технологического
университета, г. Хэфэй, Китай

ЧЖОУ Т.

Факультет гражданского строительства
Хэфэйского технологического
университета, г. Хэфэй, Китай

ВАН И.

Факультет гражданского строительства
Хэфэйского технологического
университета, г. Хэфэй, Китай

ХАН Цз.

Факультет гражданского строительства
Хэфэйского технологического
университета, г. Хэфэй, Китай

ВАН Я.

Факультет гражданского строительства
Хэфэйского технологического
университета, г. Хэфэй, Китай
wangyixian2012@hfut.edu.cn

ТОНГ Ф.

Факультет гражданского строительства
Хэфэйского технологического
университета, г. Хэфэй, Китай

ЛИ Д.

Рабочая группа по гидрогеологии и
инженерной геологии уезда Наньцзян
(округа Бачжун) Чунцинского бюро по
геологии и разведке полезных
ископаемых, г. Чунцин, Китай

ВЭНЬ Цз.

Рабочая группа по гидрогеологии и
инженерной геологии № 208
Чунцинского бюро по геологии и
разведке полезных ископаемых
Чунцинского института инженерных
исследований и проектирования для
защиты от геологических опасностей,
г. Чунцин, Китай

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод статьи китайских исследователей «Анализ влияния строительства и осушения глубокого котлована на осадки поверхности» (Li et al., 2020). Эта работа была опубликована в рецензируемом журнале *Advances in Civil Engineering* («Достижения в области гражданского строительства») издательством Hindawi в 2020 году. Она находится в открытом доступе по лицензии CC BY, 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 (Li et al., 2020) приведена в конце.

Точное прогнозирование осадок дневной поверхности является первоочередной задачей при создании глубоких котлованов с выемкой грунта ниже уровня грунтовых вод в городских условиях в целях обеспечения безопасности рабочей площадки. Деформации отложений происходят в результате совокупного действия двух факторов – откопки глубокого котлована и его осушения. Исследование, представленное в настоящей статье, было направлено на выявление суммарной реакции грунта на воздействие этих двух факторов и на получение эмпирических корреляций для оценки деформаций грунта.

На примере глубокого котлована для строительства станции метро были выполнены расчеты по аналитическим формулам и численным моделям для оценки осадок поверхности. Результаты расчетов по аналитическим формулам в условиях выемки грунта и водопонижения складывались линейно для оценки общих осадок. Также были построены суммарные трехмерные численные модели с использованием коммерческого программного обеспечения (GMS и MIDAS) для исследований влияния совместного воздействия выемки грунта и осушения на деформации отложений. Результаты этого численного моделирования хорошо совпали с данными мониторинга. Кроме того, чтобы проиллюстрировать влияние выемки грунта и водопонижения на общую осадку поверхности, с помощью полиномиальной аппроксимации было получено эмпирическое корреляционное уравнение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

деформации грунта; осадки поверхности; оценка осадок; глубокий котлован; выемка грунта; водопонижение; аналитические формулы; трехмерные численные модели; данные мониторинга; полиномиальная аппроксимация; эмпирическое корреляционное уравнение.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ли С., Чжоу Т., Ван И., Хан Цз., Ван Я., Тонг Ф., Ли Д., Вэнь Цз. Анализ влияния строительства и осушения глубокого котлована на осадки поверхности (пер. с англ.) // *Геоинфо*. 2024. Т. 6. № 7-8. С. ...-....
DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-8-...-....

RESPONSE ANALYSIS OF DEEP FOUNDATION EXCAVATION AND DEWATERING ON SURFACE SETTLEMENTS

- LI X.**
School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China
- ZHOU T.**
School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China
- WANG Y.**
School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China
wangyixian2012@hfut.edu.cn
- HAN J.**
School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China
- WANG Y.**
School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China
- TONG F.**
School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China
- LI D.**
Nanjiang Hydrogeology and Engineering Geology Team of Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing, China
- WEN J.**
№ 208 Hydrogeology and Engineering Geology Team of Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing Institute of Geological Hazard Prevention Engineering Exploration and Design, Chongqing, China

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper “Response analysis of deep foundation excavation and dewatering on surface settlements” by Chinese researchers (Li et al., 2020). It was published in the peer-reviewed journal “Advances in Civil Engineering” by the Hindawi publishing company. It is an open access article under the CC BY license 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 (Li et al., 2020) used for the presented translation is given in the end.

Accurate prediction of surface settlements is a primary concern when deep excavations were carrying out under the water table in urban environments for the safety of the work site. The sedimentation deformation due to deep excavation of foundation pit and dewatering occurs as a result of coupling action of the two factors. The study is aimed at revealing the coupling ground response to the two factors and developing empirical correlations for estimating ground deformations.

Taking a deep foundation pit of a metro station as an example, surface settlement estimations were calculated by analytical formulas and numerical models. The settlement results by analytical formulas under excavation and dewatering conditions were added linearly to the total settlements. And three-dimensional coupling numerical models were established by applying commercial software (GMS and MIDAS) to investigate the interaction impact of excavation and dewatering on the sedimentation deformation. Comparing with monitoring data, numerical simulation results match well with the monitoring data. Furthermore, an empirical surface subsidence correlation equation was developed by the polynomial fitting to illustrate the effect contribution on the total surface settlement of foundation excavation and dewatering.

KEYWORDS:

soil deformations; surface settlements; settlement estimation; deep foundation pit; soil excavation; dewatering; analytical formulas; three-dimensional numerical models; monitoring data; polynomial fitting; empirical correlation equation.

FOR CITATION:

Li X., Zhou T., Wang Y., Han J., Wang Y., Tong F., Li D., Wen J. Analiz vliyaniya stroitel'stva i osusheniya glubokogo kotlovana na osadki poverhnosti [Response analysis of deep foundation excavation and dewatering on surface settlements] // Geoinfo. 2024. T. 6. № 7-8. S. ...-.... DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-8-...-.... (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

В условиях постоянного развития городов неизбежно строительство сооружений, сильно заглубленных ниже уровня грунтовых вод. Из-за влияния грунтовых вод осушение котлована становится вспомогательным проектом, который необходимо реализовать в процессе выемки грунта с большой глубины. При этом очень большой проблемой в городских условиях являются деформации окружающих грунтов с соответствующим воздействием на соседние здания и сооружения [1–5]. Ошибочные оценки этих деформаций могут приве-

сти либо к слишком большим затратам на строительство из-за чрезмерно усиленных систем крепления выемок, либо к повреждению окружающих зданий и сооружений из-за недостаточно усиленных систем крепления. На прогнозируемые деформации значительное влияние оказывают такие факторы, как метод строительства, водопонижение и тип вмещающих грунтов [6, 7].

Большинство основных теорий об осадках, вызванных выемкой грунта, основано на методе полного напряжения, предложенном Пеком (Peck), с использованием аппроксимации огромного ко-

личества кривых по данным полевого мониторинга [8–11]. Мониторинг показывает, что результаты расчетов занижают фактические осадки. Различия между измеренными деформациями грунта и теоретическими прогнозами можно отнести к эффекту водопонижения. Процесс осушения может привести к снижению давления в водоносных горизонтах, что вызовет изменения эффективных напряжений. Когда из водоносного горизонта извлекается вода, эффективные напряжения в слагающем его грунте увеличиваются, вызывая оседание поверхности земли [12–15].

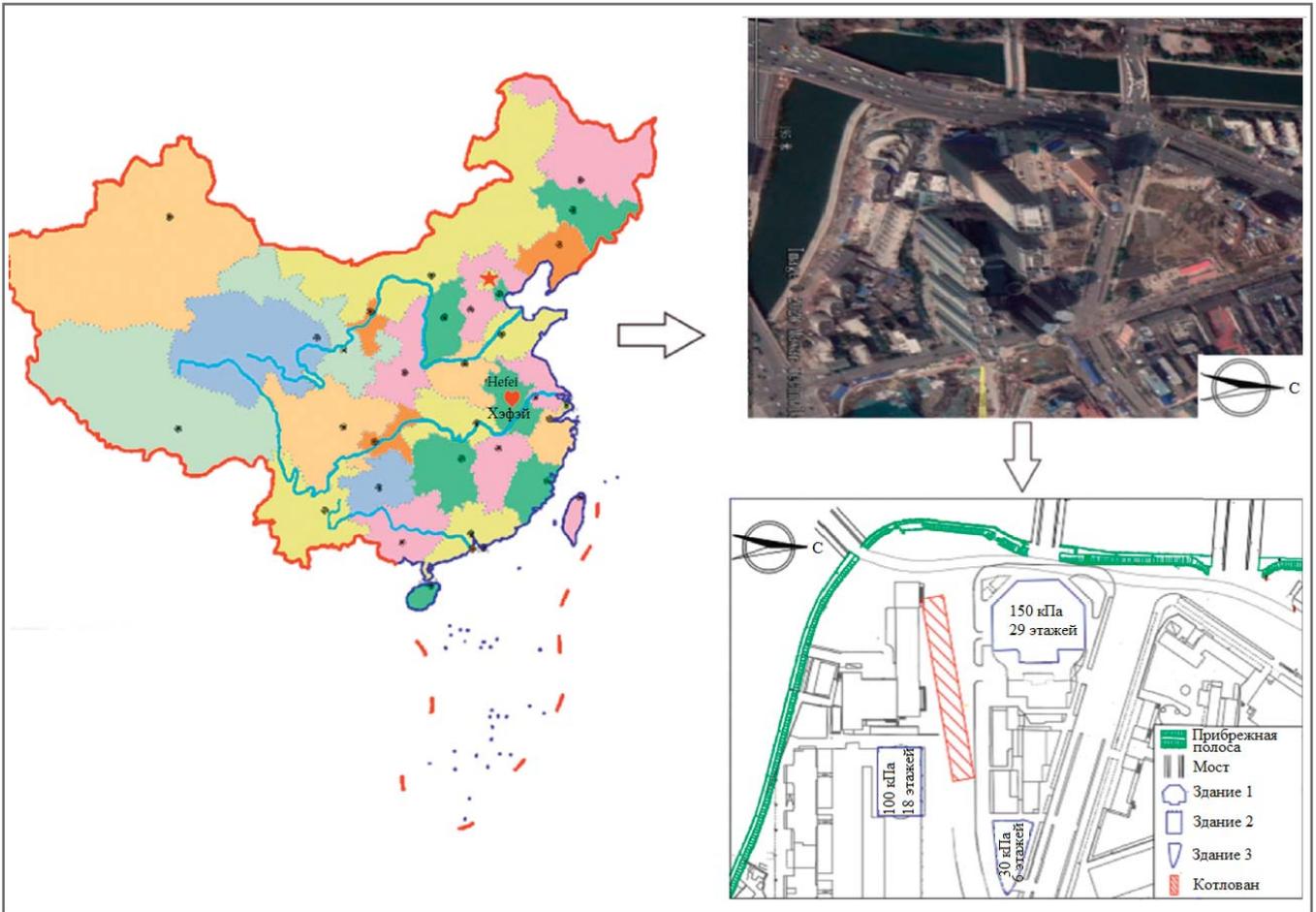


Рис. 1. Расположение и план строительной площадки и окружающей территории

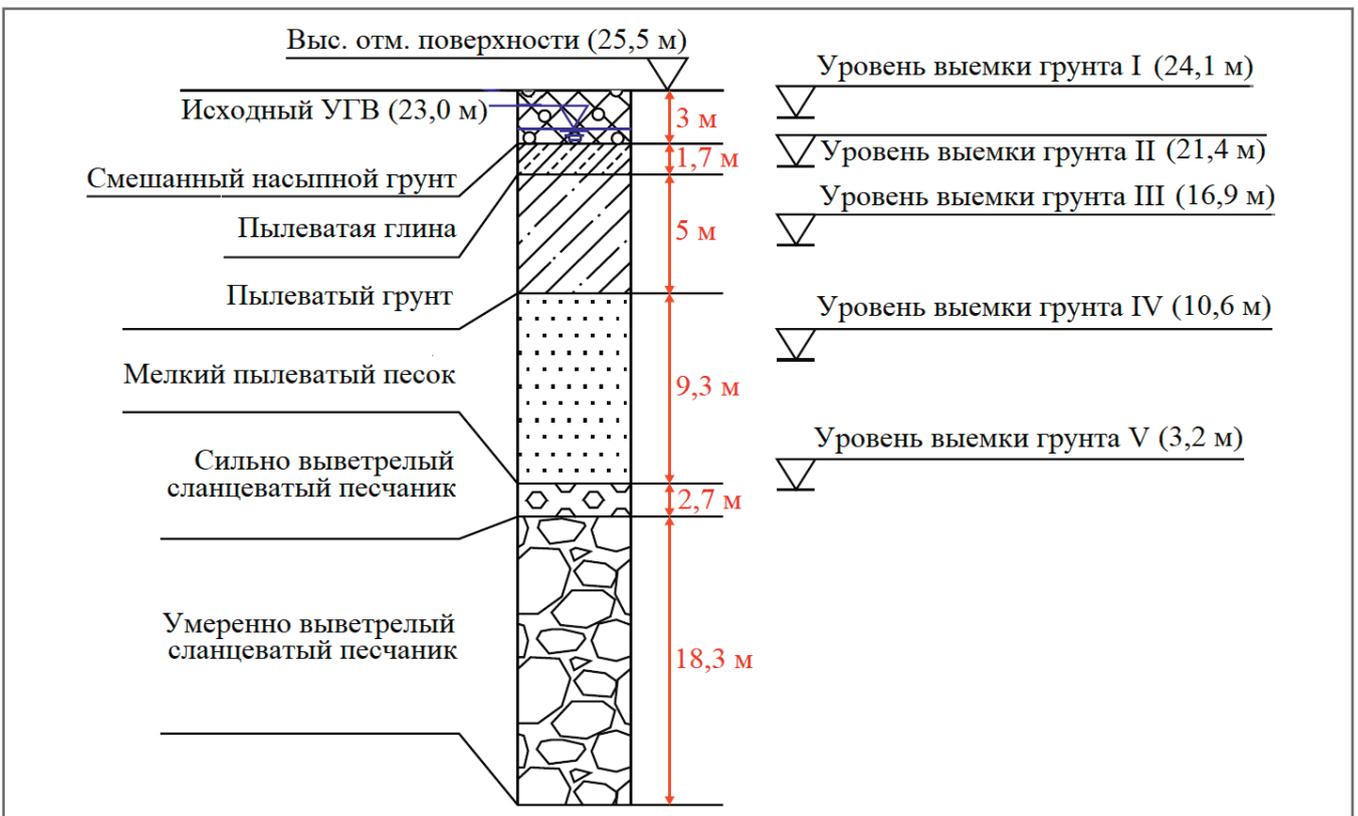


Рис. 2. Детальная геологическая колонка по данным одной из скважин на строительной площадке. УГВ – уровень грунтовых вод. (Далее в таблице 2 авторы не привели слой мелкого пылеватого песка, указанный на рисунке 2; возможно, его объединили со слоем пылеватого грунта. – Ред.)

Таблица 1. Оборудование для мониторинга осадок

Цель мониторинга	Оборудование	Точность измерений, мм	Частота измерений
Осадки поверхности земли	Trimble DiNi03	1	1 раз в 3 дня
Уровень грунтовых вод	SWJ-90-50	5	
Осадки зданий	Trimble DiNi03	1	

При исследованиях вертикальных деформаций грунта были достигнуты значительные результаты. Было выявлено, что основными факторами, вызывающими оседание, являются откопка и осушение котлована [16–18]. На основе линейной суперпозиции осадок, вызванных выемкой грунта и водопонижением, можно легко получить общую осадку поверхности, но при этом игнорируется взаимодействие между снятием напряжений при откопке котлована и падением уровня грунтовых вод при осушении.

В данной работе исследуются осадки поверхности в ответ на выемку грунта и водопонижение на примере создания глубокого котлована для строительства станции метро. Суммарные осадки в условиях откопки и осушения котлована рассчитывались по аналитическим формулам с использованием принципа линейной суперпозиции. Также с помощью коммерческого программного обеспечения (GMS и MIDAS) были созданы совокупные трехмерные численные модели для определения воздействий выемки и осушения на уровень грунтовых вод, эффективные напряжения и смещения. Затем спрогнозированные этими двумя путями осадки грунта были сопоставлены с данными реальных измерений при мониторинге, чтобы проверить достоверность результатов использования вышеуказанных расчетных методов.

МАТЕРИАЛЫ

Описание проекта

Рассматриваемый в статье котлован размером 120 м × 15 м × 22,4 м (длина × ширина × глубина) для строительства станции метро в городских условиях располагается в центральной части Китая. Западную и южную его стороны огибает река при минимальном расстоянии до нее 24 м. Основная конструкция шахты для опускания узлов тоннелепроходческого щита находится всего в 4,5 м от берега реки. На северо-западной стороне котлована располагается гостиница с условным названием

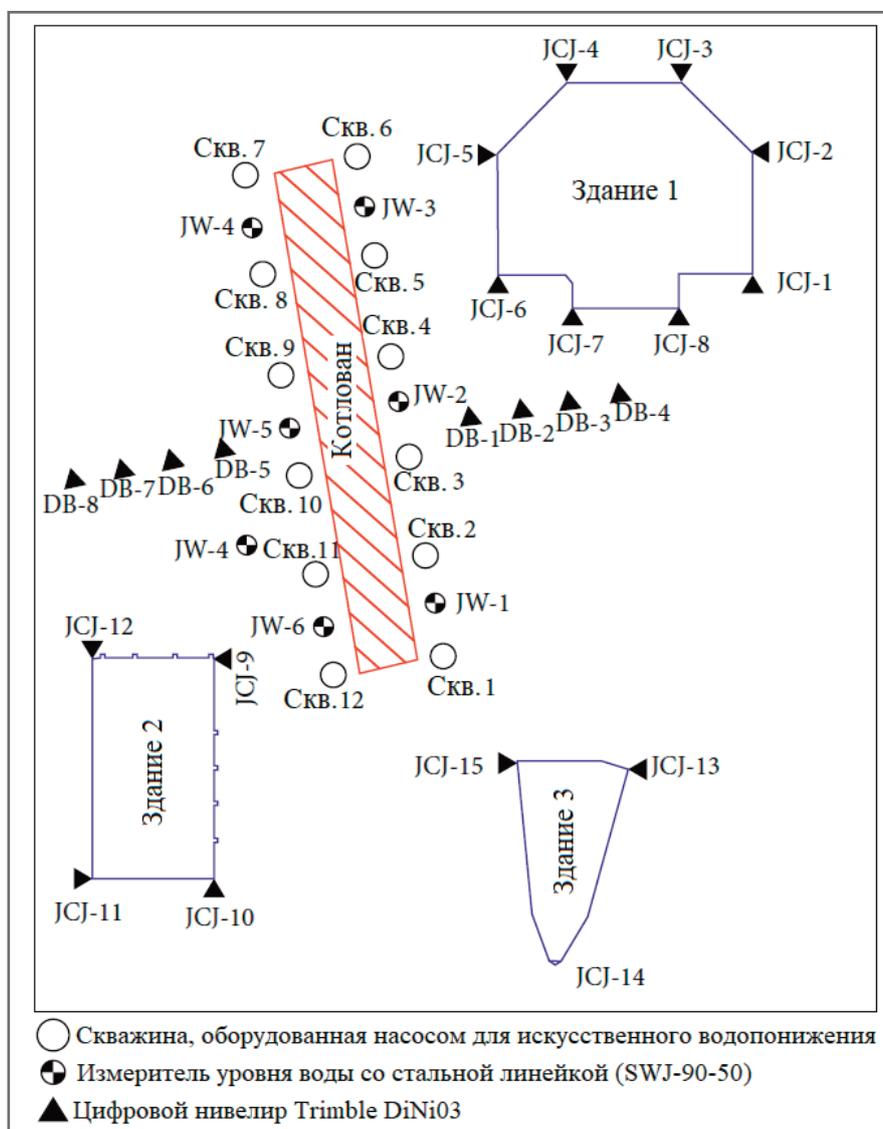


Рис. 3. План расположения точек мониторинга

«Здание 1». Ее главный корпус имеет 29 этажей, а минимальное расстояние от котлована до ее 5-этажного корпуса со свайным фундаментом составляет 10,7 м. С юго-восточной стороны от строительной площадки имеется 18-этажный торговый центр со свайным фундаментом под условным названием «Здание 2». Его минимальное расстояние от котлована – 10 м. С северо-восточной стороны находится 6-этажное «Здание 3». Расположение и план строительной площадки и окружающей территории показаны на рисунке 1.

Котлован для строительства станции метро в основном расположен в толще аллювиально-делювиальной пылеватой глины, пылеватого грунта и мелкого пылеватого песка с низкой устойчивостью. В слое мелкого пылеватого песка имеется возможность разжижения, что оказывает определенное влияние на рабочий процесс. Детальный геологический профиль строительной площадки показан на рисунке 2.

Процесс откопки глубокого котлована был разделен на пять этапов – I, II, III, IV, V при толщине вынутого грунта

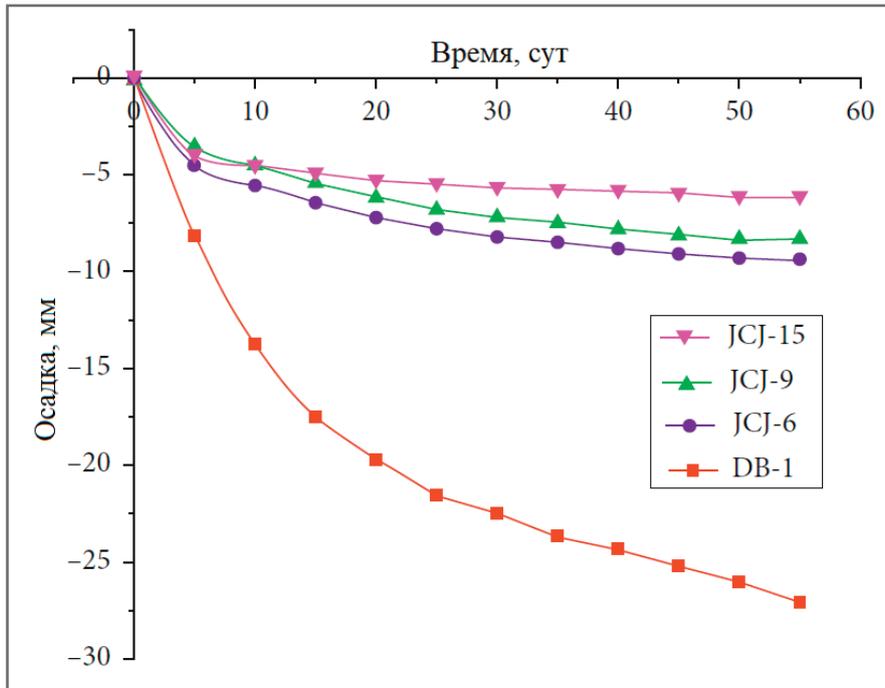


Рис. 4. Развитие осадков поверхности в точках мониторинга DB-1, JСJ-6, JСJ-9 и JСJ-15 (см. рис. 3) с начала выемки грунта

соответственно 1,4; 2,7; 4,5; 6,4; 7,4 м и высотных отметках дна соответственно 24,1; 21,4; 16,9; 10,6; 3,2 м. Первоначальный уровень грунтовых вод составлял 23 м. Отметим, что на этапе I водопонижение не требовалось, поскольку дно находилось выше УГВ. Процесс осушения котлована начался с этапа II и был разделен на четыре стадии в соответствии с этапами выемки II, III, IV и V.

Мониторинг осадок

Перед началом откопки вытянутого котлована были выполнены насосные скважины для искусственного водопонижения параллельно его более длинным бортам. Чтобы осадки поверхности окружающего грунта и УГВ соответствовали требованиям к выполнению проектных технических условий, между соседними насосными скважинами по всей длине котлована были установлены измерители уровня воды со стальной линейкой (SWJ-90-50).

Для измерения осадков поверхности земли вдоль продолжения поперечной осевой линии котлована были установлены цифровые нивелиры Trimble DiNi03 с горизонтальным шагом 5 м (таблица 1). Одновременно проводились определения осадков для зданий 1, 2 и 3.

План расположения точек измерений приведен на рисунке 3.

На строительной площадке и рядом с ней было много точек мониторинга

осадков. Чтобы графически продемонстрировать воздействие процесса выемки грунта при строительстве котлована на деформации окружающего грунта, были выбраны точки DB-1, JСJ-6, JСJ-9 и JСJ-15. На рисунке 4 показано, как увеличивались осадки этих точек с течением времени. Оседание ближайшей к котловану точки (DB-1) было наибольшим. Мониторинг трех других точек (JСJ-6, JСJ-9, JСJ-15) показал схожие тенденции в развитии осадков, но они были меньше из-за большей удаленности от котлована.

ОЦЕНКА ОСАДКОВ

Оценка осадков по аналитическим формулам

При откопке глубокого котлована ниже уровня грунтовых вод необходимо понизить УГВ так, чтобы он был на 0,5 м ниже дна, в целях предотвращения обрушения бортов или подтопления/затопления выемки.

При водопонижении образуется депрессионная воронка, которая приводит к снижению давления грунтовых вод и увеличению эффективных напряжений между частицами грунта. В процессе осушения котлована грунтовые воды медленно движутся к каждой насосной скважине в ламинарном потоке, при этом кривая депрессии распределена симметрично вокруг этой скважины (депрессионная воронка представ-

ляет собой приближительную поверхность вращения кривой депрессии вокруг оси водопонижительной скважины. – Ред.). На основе формулы Дюпюи можно получить уравнение кривой депрессии [19]:

$$y^2 = (l + h)^2 + [H^2 - (l + h)^2] \frac{\ln(x/r)}{\ln(R/r)}, \quad (1)$$

где x – горизонтальное расстояние от оси скважины; l – длина водоприемной трубы скважины; r – радиус скважины; h – вертикальное расстояние от несовершенной скважины до водоносного горизонта (для совершенной скважины $h=0$); R – радиус водопонижающего воздействия.

В процессе осушения внутри неводонасыщенной зоны присутствует воздух и поровая вода будет находиться под воздействием растягивающих напряжений. Дифференциальные уравнения равновесного и напряженного состояния частиц грунта и поровой воды можно объединить, чтобы получить единое уравнение эффективных напряжений, применимое для неводонасыщенного и водонасыщенного грунта [20]:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + S_e(u_a - u_w),$$

$$S_e = \frac{(S - S_r)}{(1 - S_r)} = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)}, \quad (2)$$

$$\tau = u_a - u_w.$$

где S_e , S_r – соответственно эффективная и остаточная водонасыщенность грунта; θ_s и θ_r – соответственно насыщенная и остаточная объемная влажность грунта; τ – каркасная сосущая сила (каркасное всасывающее давление), измеряемая с помощью устройства трехосного сжатия в неводонасыщенных условиях и устройства с нажимной пластиной. Когда $S_e=1$, формула (2) превращается в уравнение для эффективного напряжения в водонасыщенном грунте.

Эффективное напряжение в грунте, залегавшем выше УГВ до начала откопки котлована, не менялось, а в грунте, находившемся в неводонасыщенной зоне, оно менялось следующим образом:

$$\Delta\sigma'_1 = \gamma_w(H - y) + (S_e - 1)\tau. \quad (3)$$

В случае водонасыщенного грунта поры между его частицами полностью заполнены водой и понижение УГВ приводит к уменьшению давления воды в порах. Тогда уравнение (3) превращается в уравнение для эффективного напряжения в водонасыщенном грунте,

Таблица 2. Физико-механические параметры слоев грунта (в таблице 2 не приведен слой мелкого пылеватого песка, указанный на рисунке 2; возможно, его объединили со слоем пылеватого грунта. – Ред.)

Грунт	Мощность слоя H , м	Модуль упругости E , МПа	Удельное сцепление c , кПа	Угол внутр. Трения φ , ° (град.)	Коэф. Пуассона ν	Коэф. Фильтрации k , м/сут
Смешанный насыпной	3,1	8	15	10	-	0,05
Пылеватая глина	1,7	12	10	24	0,35	0,01
Пылеватый	5	10	-	-	0,3	1
Сильно выветрелый сланцеватый песчаник	2,7	53	50	26	0,24	1
Умеренно выветрелый сланцеватый песчаник	-	50	130	33	0,23	1

а изменение эффективного напряжения равно уменьшению давления воды:

$$\Delta\sigma'_2 = \gamma_w (H - y). \quad (4)$$

Осадки поверхности, вызванные водопонижением, могут быть рассчитаны методом послойного суммирования следующим образом:

$$s = \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_i}{E_i} h_i. \quad (5)$$

где s – осадка дневной поверхности, вызванная водопонижением; s_i – осадка поверхности слоя грунта i ; E_i – модуль упругости слоя i ; h_i – толщина слоя i .

Согласно формуле послойного суммирования (5) эффективное напряжение в зоне осушенного грунта не изменилось, поэтому в этой зоне $s_1=0$.

Оседание грунта в неводонасыщенной зоне происходит в соответствии с зависимостью:

$$s_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_w (H - y) + \tau (S_e - 1)}{E_i} h_i. \quad (6)$$

Оседание грунта в водонасыщенной зоне происходит следующим образом:

$$s_3 = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_w (H - y)}{E_i} h_i. \quad (7)$$

Разгрузка в результате откопки котлована нарушает баланс напряжений от собственного веса грунта и приводит к осадкам окружающей поверхности. Осадки, вызванные выемкой грунта, рассчитываются согласно эмпирической формуле, полученной с помощью функции распределения Рэлея [8]:

$$s_4 = s_{vm} \cdot \frac{(d/H) + 0.75}{0.9} \cdot \exp\left\{-\frac{[(d/H) + 0.75]^2}{4.5}\right\}, \quad (8)$$

$$s_{vm} = \alpha s_{hm},$$

$$s_{hm} = k_g H,$$

где d – горизонтальное расстояние от рассматриваемой точки до котлована; H – глубина выемки грунта; s_{vm} – максимальная осадка (вертикальное смещение) ограждения котлована; s_{hm} – мак-

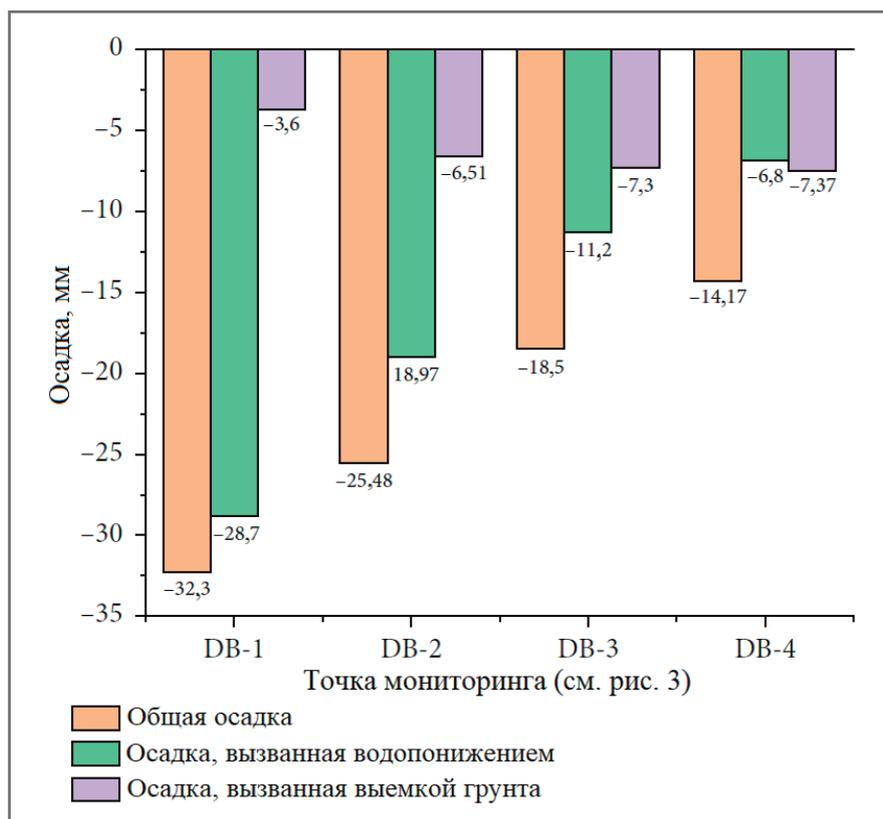


Рис. 5. Результаты теоретических расчетов осадок поверхности по аналитическим формулам

симальная горизонтальная деформация ограждения котлована; α – эмпирический коэффициент; k_g – коэффициент пропорциональности.

Чтобы оценить общее вертикальное смещение поверхности, осадки, вызванные как осушением, так, и откопкой котлована, суммируются:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 + s_4. \quad (9)$$

В таблице 2 представлены физико-механические параметры слоев грунта. Инженерно-геологические параметры определялись с помощью традиционных испытаний [21–23].

Результаты расчетов по аналитическим формулам показаны на рисунке 5. Ряды точек мониторинга DB (см. рис. 3)

симметрично расположены на продолжении поперечной осевой линии с обеих длинных сторон котлована, что позволяет лучше понять закономерности оседания грунта. Как видно из рисунка 5, водопонижение является основным фактором, вызывающим оседание грунта, особенно в ближайшей к котловану точке DB-1, где вклад осушения в общую осадку составил 88,9%. Расстояние до котлована увеличивалось в ряду DB-1, DB-2, DB-3, DB-4. Чем дальше точка мониторинга находилась от котлована, тем медленнее была скорость опускания УГВ и тем меньше были изменения эффективных напряжений в грунте, что приводило к меньшему вкладу водопонижения в общее оседание поверхности.

Оценки осадок с помощью численных моделей

С использованием коммерческого программного обеспечения (GMS и MI-DAS) были созданы трехмерные численные модели для исследований совместного влияния откопки котлована и водопонижения на деформации грунтов (рис. 6). Были приняты значения параметров отложений, указанные в таблице 2. Отметим, что ширина реки составляет примерно 30–80 м, глубина – около 5–6 м.

На рисунке 7 показаны изменения УГВ после каждого этапа водопонижения. В процессе осушения уровень грунтовых вод распределялся в форме несимметричной воронки с самой глубокой частью в форме колодца под котлованом и рядом с ним. Чем больше расстояние от котлована, тем меньше понижение УГВ (рис. 8).

На рисунке 9 показаны смоделированные осадки поверхности на каждом этапе откопки котлована в зависимости от горизонтального расстояния от него. К концу первого этапа глубина выемки составляет 1,4 м, а строительство системы крепления бортов в это время еще не завершено. Из-за разгрузки от собственного веса грунта основание котлова-

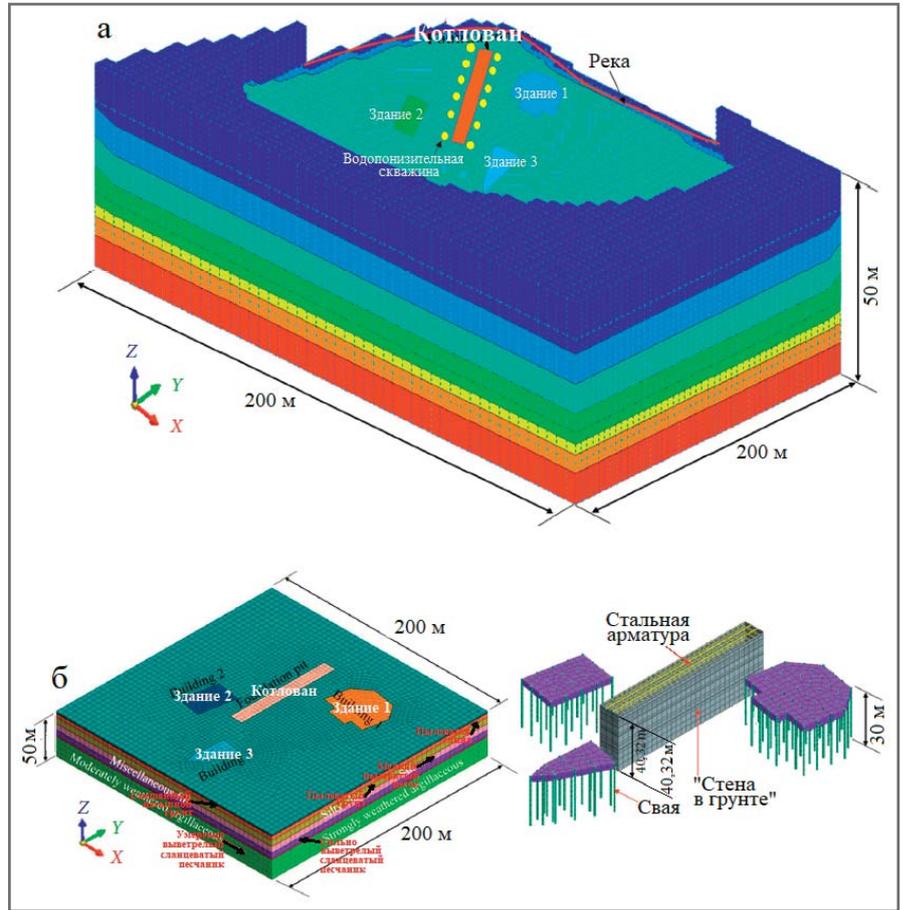


Рис. 6. Объединение численных моделей

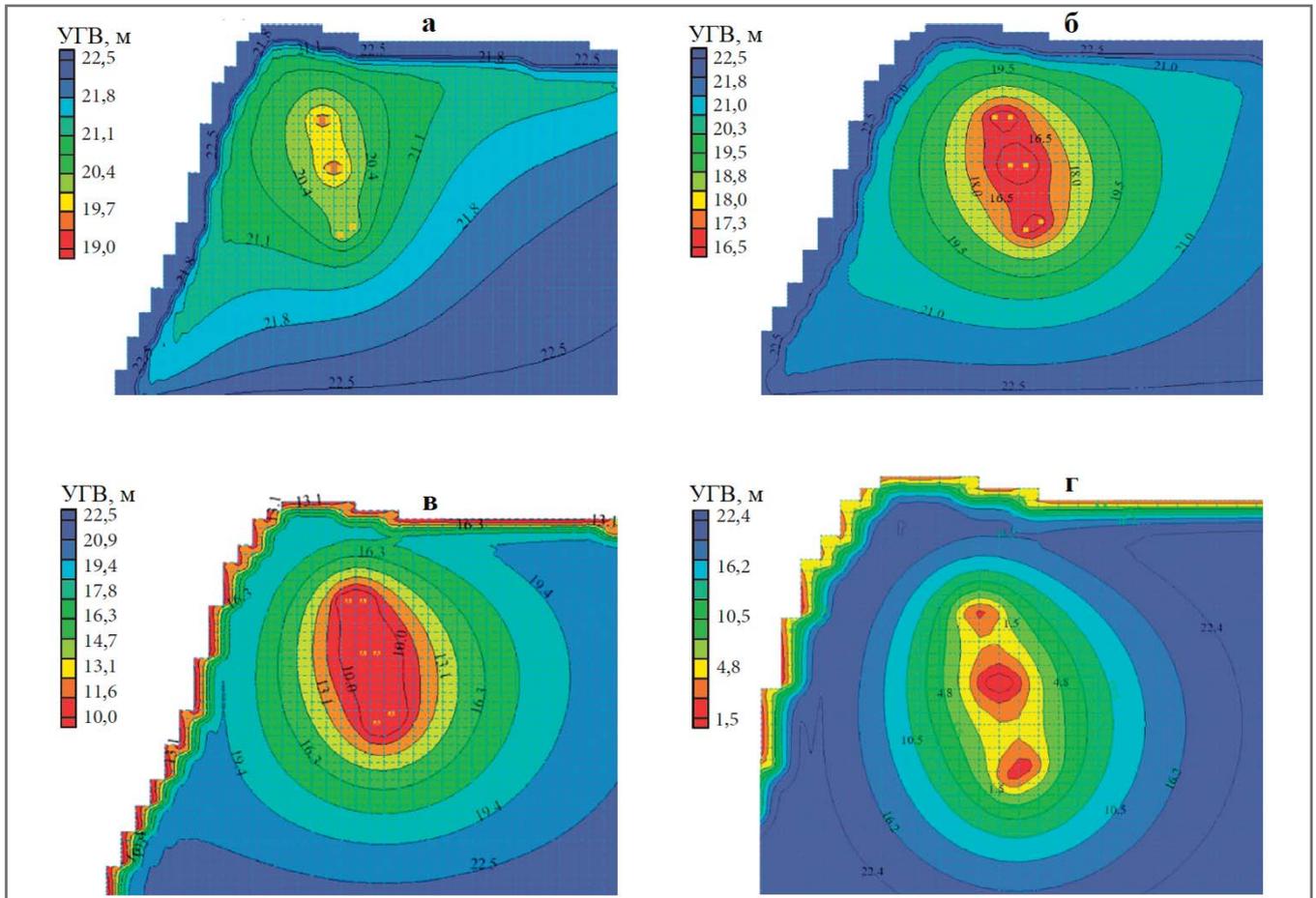


Рис. 7. Изолинии УГВ после этапов водопонижения: а – первого; б – второго; в – третьего; г – четвертого

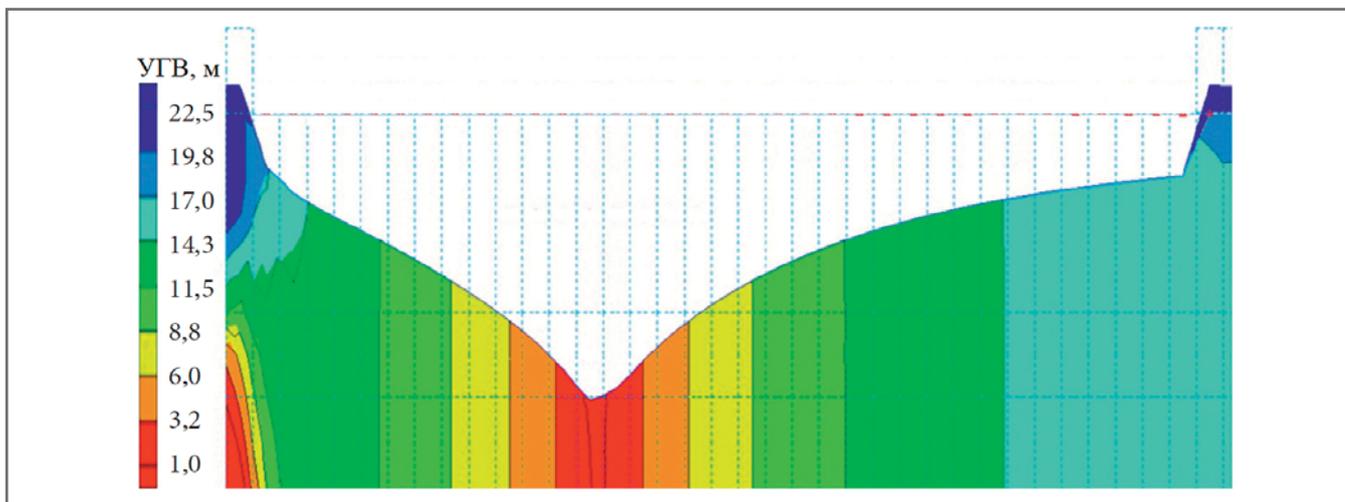


Рис. 8. Вертикальный разрез УГВ (проходящий через среднюю часть котлована поперек его длинной оси) после четвертого этапа водопонижения

на приподнято. Кривая осадок имеет форму ложки. Осадки возрастают с удалением от котлована вплоть до расстояния 8 м, но при дальнейшем увеличении расстояния они уменьшаются. Суммарная осадка после пяти этапов выемки грунта достигает максимума на пятом этапе и составляет 26,1 мм.

СРАВНЕНИЕ ОСАДОК, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЕМ РАСЧЕТОВ И МОНИТОРИНГА ▶

На рисунке 10 сопоставлены осадки, оцененные с помощью расчетов (по аналитическим формулам и численным моделям) и измеренные при мониторинге. Видно, что результаты моделирования, полученные на основе модели взаимодействия «жидкость – твердое тело», лучше согласуются с данными мониторинга, чем результаты аналитических расчетов. Это показало, что вычисленные осадки поверхности при выемке грунта и водопонижении не могут быть просто линейно сложены. Ведь по мере падения УГВ эффективные напряжения увеличивались, что изменяло пористость грунта и влияло на условия движения воды. Однако при использовании метода аналитических расчетов осадки, вызванные откопкой и осушением котлована, складывались напрямую без учета взаимодействий «вода – грунт», что привело к завышению осадок по сравнению с достоверными данными мониторинга.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ ▶

В данной работе для прогноза осадок поверхности под воздействием откопки и осушения глубокого котлована для строительства станции метро использовались аналитические формулы и чис-

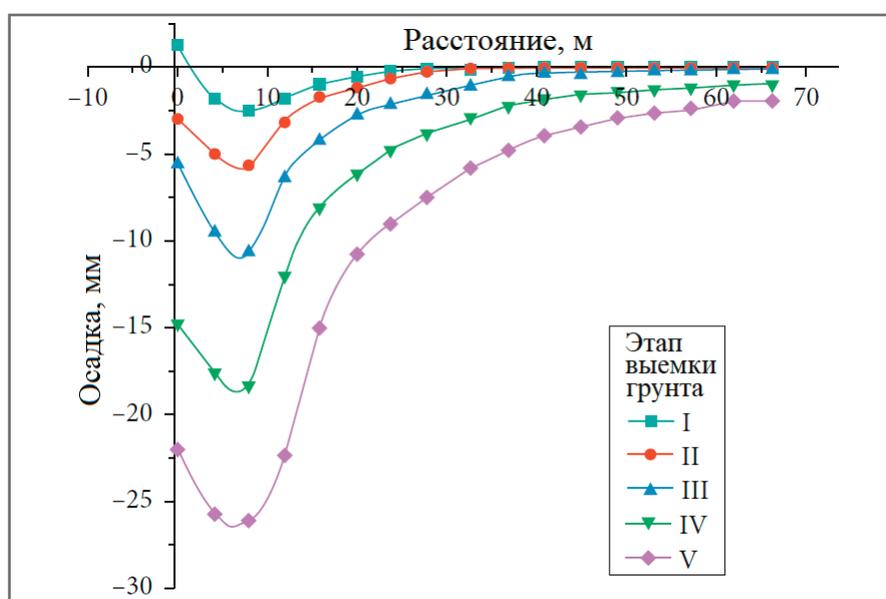


Рис. 9. Кривые зависимости осадок от расстояния до котлована по результатам численного моделирования

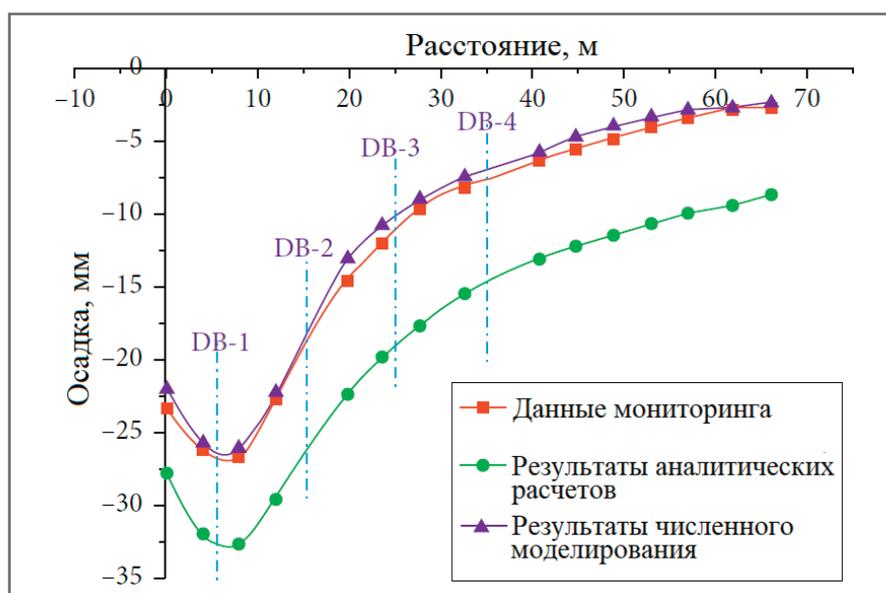


Рис. 10. Сопоставление осадок, полученных разными методами

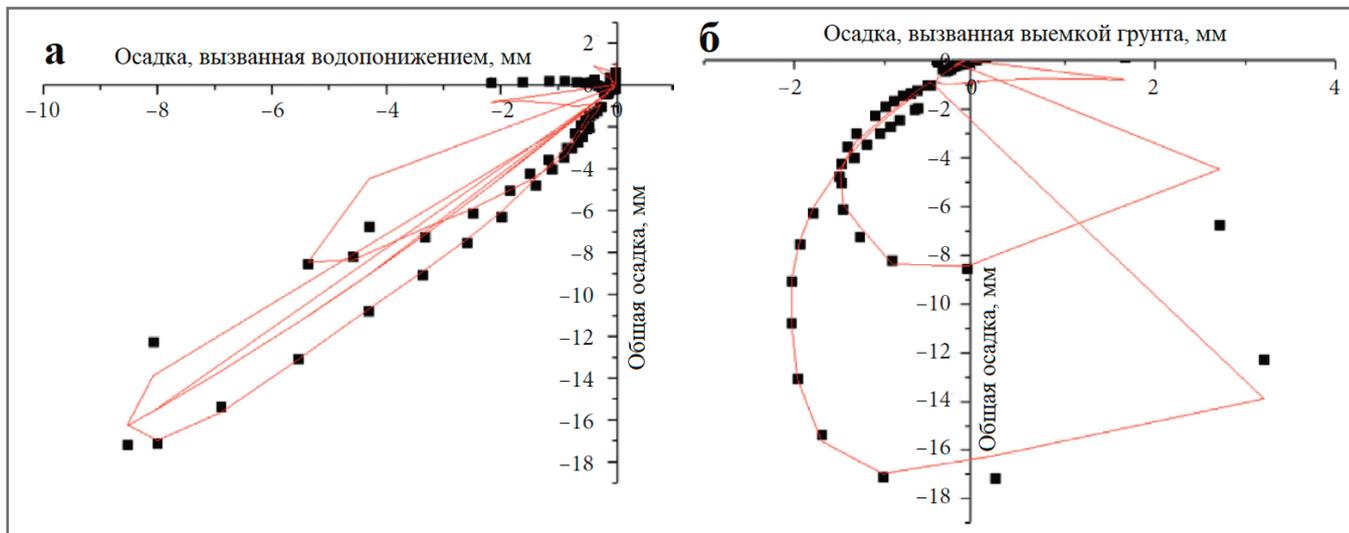


Рис. 11. Графики корреляций осадок, вызванных водопадением (а) и вызванных выемкой грунта (б), с общей осадкой поверхности (иллюстрация вкладов воздействий откопки и осушения котлована в общую осадку поверхности)

ленные модели. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Распределение осадок поверхности, вызванных выемкой грунта, в зависимости от расстояния до котлована, имеет форму ложки, глубина которой пропорциональна общей глубине выемки (см. рис. 3, 9). На расстоянии 6,1 м осадка достигает максимального значения, равного 26,1 мм. Результаты аналитических расчетов показали, что осадки в основном вызваны водопадением. По мере увеличения расстояния до котлована изменения эффективных напряжений в толще грунта при падении УГВ становятся меньше, что уменьшает влияние осушения на вертикальные деформации отложений.

2. Результаты численного моделирования, полученные на основе модели взаимодействия «жидкость – твердое те-

ло», лучше соответствуют данным мониторинга, чем результаты аналитических расчетов. Отсюда можно заключить, что вертикальные деформации отложений под воздействием откопки и осушения котлована не могут быть просто линейно сложены. Поэтому, чтобы проиллюстрировать вклады воздействий выемки грунта и водопадения в общую осадку поверхности (рис. 11), было получено эмпирическое корреляционное уравнение с помощью полиномиальной аппроксимации. Эта общая осадка может быть выражена через осадки в результате откопки котлована и в результате его осушения следующим образом:

$$z = -0,08x^2 + 0,93x + 0,01y^2 + 1,101y + 0,015, \quad (10)$$

где z – общая осадка; x – осадка, вызванная водопадением; y – осадка, вызванная выемкой грунта.

Значение коэффициента детерминации R^2 после такого вычисления составляет 0,999, поэтому уравнение (10) можно считать точным. **и**

Это исследование было профинансировано Национальным фондом естественных наук Китая (51774107, 42077249), Открытой программой Государственной ключевой лаборатории взрывотехники при Пекинском технологическом институте (KFJJ19-02M) и фондами фундаментальных исследований Департамента жилищного строительства провинции Аньхой (2013YF-27).

Численные результаты, использованные для подтверждения выводов представленного исследования, могут быть по запросу получены у авторов (wangyixian2012@hfut.edu.cn).

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Li X., Zhou T., Wang Y., Han J., Wang Y., Tong F., Li D., Wen J. Response analysis of deep foundation excavation and dewatering on surface settlements // *Advances in Civil Engineering*. Hindawi, 2020. Article ID 8855839. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/8855839>; <https://www.hindawi.com/journals/ace/2020/8855839/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►

1. Kihm J.H., Kim J.M., et al. Three-dimensional numerical simulation of fully coupled groundwater flow and land deformation due to groundwater pumping in an unsaturated fluvial aquifer system // *Journal of Hydrology*. 2007. Vol. 335. № 1-2. P. 1–14.
2. Faunt C.C., Sneed M.J., Brandt J.T. Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA // *Hydrogeology Journal*. 2016. Vol. 24. № 3. P. 675–684.
3. Traum M., Adiyaman I. The influence of clay zones on land subsidence from groundwater pumping // *Ground Water*. 2013. Vol. 51. № 1. P. 51–57.
4. Galloway D.L., Burbey T.J. Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction // *Hydrogeology Journal*. 2011. Vol. 19. № 8. P. 1459–1486.

5. Jesus C.R. Settlements around pumping wells: analysis of influential factors and a simple calculation procedure // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 548. P. 225–236.
6. Roy D., Robinson K.E. Surface settlements at a soft soil site due to bedrock dewatering // *Engineering Geology*. 2009. Vol. 107. № 3-4. P. 109–117.
7. Pujades E., Vazquez-Sune E., Carrera J., Jurado A. Dewatering of a deep excavation undertaken in a layered soil // *Engineering Geology*. 2014. Vol. 178. P. 15–27.
8. Peck R.B. Deep excavations and tunneling in soft ground // *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, USA, August 1969. Scientific Research Publishing, 1969.
9. Leung E.H.Y., Ng C.W.W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2007. Vol. 133. № 2. P. 129–143.
10. Guo P., Gong X. Displacement and force analyses of braced structure of deep excavation considering unsymmetrical surcharge effect // *Computers and Geotechnics*. 2019. Vol. 113. № 2. Article 103102.
11. Di H. Guo H., Zhou S., Chen J., Wen L. Investigation of the axial force compensation and deformation control effect of servo steel struts in a deep foundation pit excavation in soft clay // *Advances in Civil Engineering*. 2019. Vol. 2019. № 6. Article ID 5476354.
12. Budhu M., Adiyaman I.B. Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2010. Vol. 34, № 14. P. 1459–1478.
13. Ni J.C., Cheng W.C., Ge L. A case history of field pumping tests in a deep gravel formation in the Taipei Basin, Taiwan // *Engineering Geology*. 2011. Vol. 117. № 1-2. P. 17–28.
14. Loaiciga H.A. Consolidation settlement in aquifers caused by pumping // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2013. Vol. 139. № 7. P. 1191–1204.
15. Pacheco-Martinez J., Hernandez-Marin M., Burbey T.J., et al. Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico // *Engineering Geology*. 2013. Vol. 164. P. 172–186.
16. Jayeoba A., Mathias S.A., Nielsen S., Vilarrasa V., Bjornara T.I. Closed-form equation for subsidence due to fluid production from a cylindrical confined aquifer // *Journal of Hydrology*. 2019. Vol. 573. P. 964–969.
17. Ng C.W.W., Hong Y., Liu G.B., Liu T. Ground deformations and soil-structure interaction of a multi-propped excavation in Shanghai soft clays // *Geotechnique*. 2012. Vol. 62. № 10. P. 907–921.
18. Hashash Y.M.A., Osouli A., Marulanda C. Central artery/tunnel project excavation induced ground deformations // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2008. Vol. 134. № 9. P. 1399–1406.
19. Bear J. *Hydraulics of Groundwater*. New York, NY, USA: McGraw-Hill International Book, 1979. Vol. 5.
20. Longtan S., Yalong Q., Xiaoxia G., et al. The validation of the effective stress principle of unsaturated soils // *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*. 2018. Vol. 14. № 6. P. 1476–1483.
21. Mohammadi S.D., Nikoudel M.R., Rahimi H., Khamsehchyan M. Application of the dynamic cone penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils // *Engineering Geology*. 2008. Vol. 101. № 3-4. P. 195–203.
22. Wang M., Wan W. A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019. Vol. 123. Article ID 104094.
23. Wang M., Wan W., Zhao Y. Experimental study on crack propagation and the coalescence of rock-like materials with two preexisting fissures under biaxial compression // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020. Vol. 79. № 6. P. 3121–3144.



Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>