

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРОДЕ ХАНОЙ (ВЬЕТНАМ)

ASSESSMENT AND PROGNOSTICATION OF LAND SUBSIDENCE CAUSED BY GROUNDWATER EXPLOITATION IN HANOI (VIETNAM)

ТХИНЬ Ф.Х.

Аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, г. Томск, Россия

СТРОКОВА Л.А.

Доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, к.г.-м.н., г. Томск, Россия, strokova@sibmail.com

МИНЬ Н.Н.

Мастер Ханойской акционерной консалтингово-испытательной компании транспортного строительства № 1, г. Ханой, Вьетнам

THINH P.H.

A postgraduate student of the hydrogeology, engineering geology and hydrogeoecology department of the Institute of Natural Resources of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

STROKOVA L.A.

An associate professor of the hydrogeology, engineering geology and hydrogeoecology department of the Institute of Natural Resources of Tomsk Polytechnic University, candidate of geological-mineralogical sciences, Tomsk, Russia

MINH N.N.

A master of the Hanoi Transport Engineering Consultant and Testing Joint Stock Company № 1

Ключевые слова:

Ханой; Вьетнам; оседание поверхности; осадка; извлечение подземных вод; напряженно-деформированное состояние; моделирование.

Key words:

Hanoi; Vietnam; surface subsidence; settlement; groundwater pumping; deflected mode; modeling.

Аннотация

В статье представлены результаты исследований прогрессирующих оседаний земной поверхности, вызванных консолидацией сжимаемых водоносных слоев в результате все увеличивающегося извлечения подземных вод в городе Ханое (Вьетнам). Эти исследования включали моделирование развития величин осадков во времени. Вычисленные осадки удовлетворительно коррелировали с данными натурных наблюдений. Авторы указывают на серьезность исследуемой проблемы и необходимость продолжения исследований в этой области на территории г. Ханоя.

Abstract

the article presents the research results of progressing surface subsidence caused by consolidation of compressible aquiferous deposits as a result of increasing groundwater pumping in Hanoi (Vietnam). Those investigations included modeling of settlement development depending on time. The calculated settlements satisfactorily correlate with the data of field observations. The authors point out seriousness of the problem and necessity of continuing those investigations in the territory of Hanoi.

В последние десятилетия оседание земной поверхности, связанное с интенсивным забором подземных вод, стало широко распространенным явлением. Например, в гавани Лонг-Бич (близ г. Лос-Анджелеса, США) его величина составила 9 м, в долине Сан-Хоакин (Калифорния, США) — 8,5 м, в Мехико — 8 м, в Токио — 4 м. В меньшей степени оседание зарегистрировано во многих других городах — Осаке и Ниигате (Япония), Венеции (Италия), Таллине (Эстония), Лондоне (Великобритания), Ханое (Вьетнам) и др.

Вопросам оседания поверхности земли, связанного с интенсивным забором подземных вод, посвящены многие работы [3, 2, 5, 9 и др.]. Целью настоящей статьи были оценка и анализ такого оседания на территории города Ханоя (Вьетнам). Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: (1) выявить факторы, определяющие развитие осадков; (2) выяснить и изучить причины массовых деформаций на участках с различными типами состава, строения, состояния и свойств грунтовых толщ; (3) сделать прогноз оседания поверхности на ближайшие годы в связи с увеличивающимся водоотбором.

Для предварительной оценки и анализа оседания поверхности на территории г. Ханоя была использована программа TZP, разработанная П.Х. Жао (P.H. Giao) [2], при сочетании применения двухмерной модели движения подземных вод и одномерной модели консолидации на базе метода конечных элементов.

Специфической особенностью разреза территории г. Ханоя является наличие мощной толщи четвертичных отложений различного генезиса и возраста (от плейстоцена до позднего голоцена), характеризующихся различным гранулометрическим составом — от галечников до тяжелых глин [1, 4, 10]. В разрезе четвер-



тичных отложений выделяют пять свит, различающихся по возрасту и генезису (снизу вверх):

- раннеплейстоценовую (свиту Лэчи — *allc*) мощностью 3–25 м, сложенную аллювиальными грунтами, представленными гальками, гравием, линзами песков, супесей или суглинков;
- средне-позднеплейстоценовую (свиту Ханой — *a,apII–III¹hn*) мощностью 10–34 м, сложенную аллювиальными и аллювиально-пролювиальными грунтами, представленными гальками, гравием и песками, местами суглинками и супесями, развитыми в верхней части разреза;
- позднеплейстоценовую (свиту Виньфук — *a,l,lbIII²vp_{1,2,3}*) мощностью 6–38 м, представленную аллювиальными, озерными и озерно-болотными отложениями с определенными закономерностями перехода от песков в нижней части разреза к суглинкам и глинам в верхней (местами также прослеживаются суглинки с органическими остатками);
- ранне-среднеголоценовую (свиту Хайхынг — *lb,m,bIV¹⁻²hh_{1,2,3}*) мощностью 1–20 м, состоящую из озерно-болотных, морских и болотных отложений, относящихся к специфическим слабым водонасыщенным грунтам и представленным суглинками и глинами с органическими остатками в основании разреза, постепенно сменяющимися морскими глинами синего цвета;
- позднеголоценовую (свиту Тхайбинь — *a,alblV³tb_{1,2}*) мощностью 1–26 м, представленную аллювиальными и аллювиально-озерно-болотными отложениями, имеющими широкое распространение и характеризующимися постепенным переходом от песков к супесям и суглинкам, местами с включениями органических остатков.

В пределах глубины градостроительного освоения г. Ханоя зафиксировано наличие двух водоносных горизонтов. В верхней части разреза современных аллювиальных отложений (*aIV³tb_{1,2}*), представленным водонасыщенными песками, местами с гравием, прослеживается голоценовый водоносный горизонт (*qh*). Коэффициент его водопроницаемости изменяется от 20 до 790, чаще от 200 до 400 м²/сут. Положение статического уровня этого горизонта зависит от интенсивности атмосферных осадков и уровня воды в р. Красной и изменяется в пределах 1–5 м от поверхности земли в течение года.

Повсеместное распространение на территории города имеет плейстоценовый слабонапорный водоносный горизонт (*qp*), водовмещающими породами которого являются крупнообломочные образования (галька и гравий) и пески (*allc*, *a,apII–III¹hn* и *aIII²vp₁*). Коэффициент водопроницаемости этого горизонта составляет от 50 до 2300 м²/сут, коэффициент фильтрации его грунтов — от 20 до 68 м/сут.

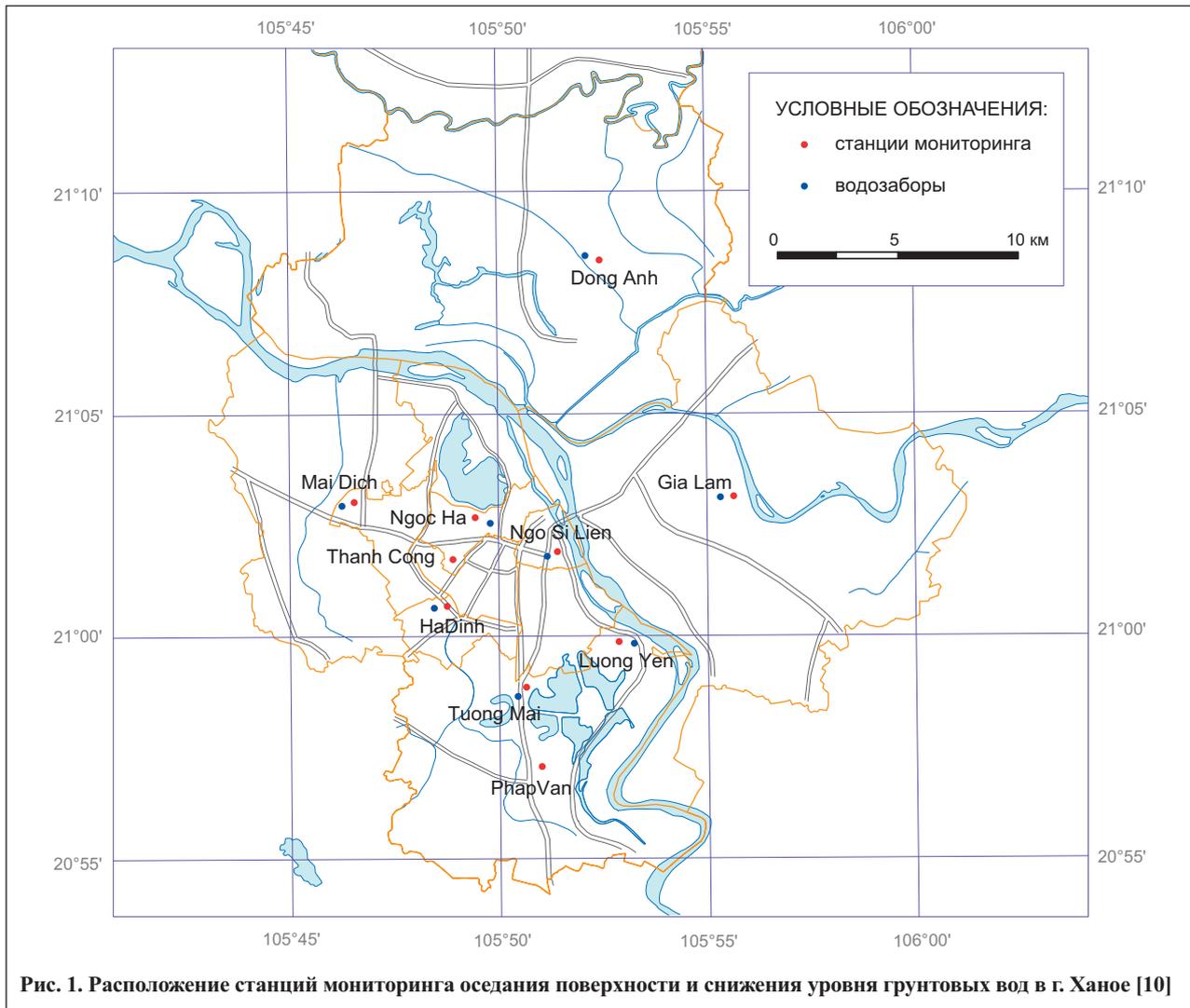


Рис. 1. Расположение станций мониторинга оседания поверхности и снижения уровня грунтовых вод в г. Ханое [10]

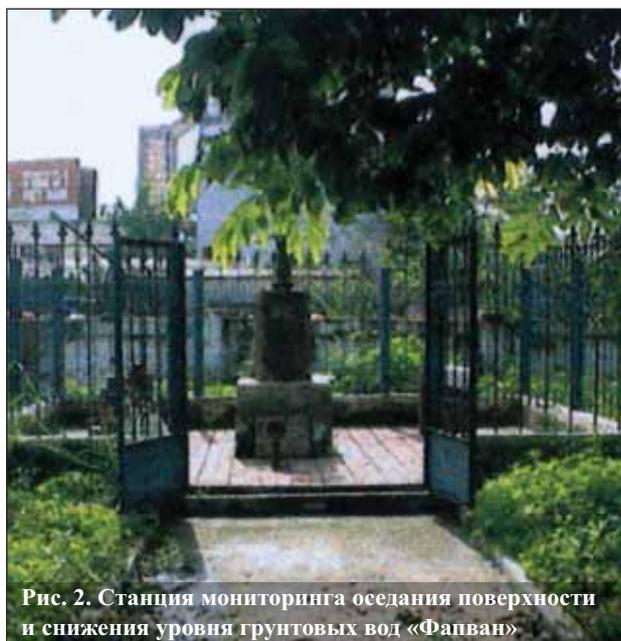


Рис. 2. Станция мониторинга оседания поверхности и снижения уровня грунтовых вод «Фапван»

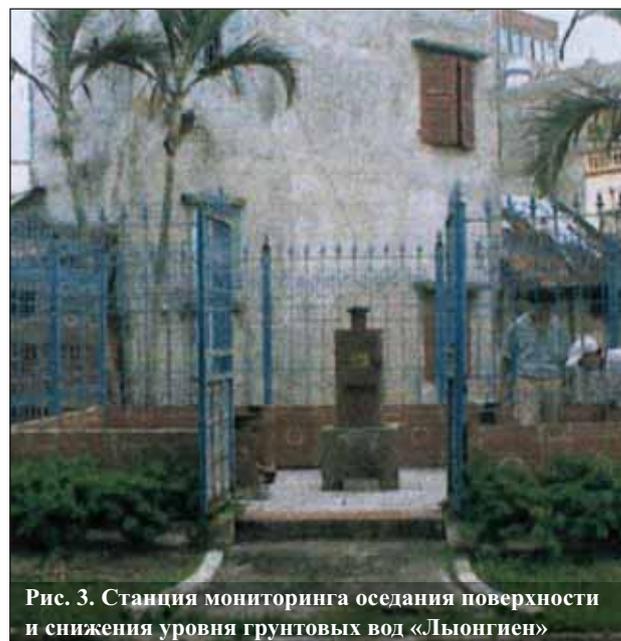


Рис. 3. Станция мониторинга оседания поверхности и снижения уровня грунтовых вод «Льонгиен»

По данным гидрогеологической службы г. Ханоя [6], в городе действуют три основные формы водозабора подземных вод: общественные, промышленных предприятий и частные.

В г. Ханое действуют 10 крупных и 11 мелких общественных предприятий (станций водоснабжения), занимающихся обеспечением населения водой. Они в общей сложности имеют 164 скважины, пробуренные на плейстоценовый водоносный горизонт, со средней мощностью 668 тыс. м³/сут (по данным 2008 г.). Для водоснабжения промышленных предприятий в общей сложности действует 513 скважин. Они также пробурены на плейстоценовый водоносный горизонт на глу-

бину от 32 м до 85 м, при средней производительности 152 тыс. м³/сут (по данным 2008 г.). Частных водозаборных скважин насчитывается около 111 тыс. Их глубина небольшая, они используют голоценовый водоносный горизонт или верхнюю часть плейстоценового и имеют общую производительность 111 тыс. м³/сут (по данным 2008 г.).

Общая добыча подземных вод в 2008 году составила 931 тыс. м³/сут. В дальнейшем суточный расход воды увеличится до 950–1050 тыс. м³/сут к 2015 году и до 1180–1250 тыс. м³/сут к 2020 году. Большая часть воды забирается из плейстоценового водоносного горизонта (*qp*).

Таблица 1

Данные наблюдений за оседанием поверхности и снижением уровня подземных вод по 10 станциям мониторинга [8]						
Станция	Период проведения мониторинга оседания земной поверхности, гг.	Осадка поверхности, мм	Скорость оседания поверхности, мм/год	Период проведения мониторинга уровня подземных вод, гг.	Понижение уровня подземных вод, м	Скорость снижения уровня подземных вод, м/год
Нгокха (Ngoc Ha)	1994–2005	21,65	1,80	1994–2008	4,18	0,28
Фапван (Phap Van)	1996–2005	221,67	22,17	1996–2008	4,66	0,36
Тханьконг (Thanh Cong)	1996–2004	372,80	41,42	1997–2008	10,69	0,89
Хадинь (Ha Dinh)	1997–2004	147,70	18,46	1998–2008	5,32	0,48
Майзич (Mai Dich)	1997–2004	21,18	2,65	1998–2008	6,88	0,63
Льонгиен (Luong Yen)	1999–2004	96,84	18,46	2000–2008	7,56	0,84
Донган (Dong Anh)	2002–2004	4,22	1,41	2002–2008	1,12	0,16
Нгосильен (Ngo Si Lien)	2002–2004	94,55	31,52	2002–2008	4,12	0,59
Гиа Лам (Gia Lam)	2002–2004	31,00	10,33	2003–2008	1,50	0,25
Танмай (Tuong Mai)	2002–2004	46,02	15,34	2003–2008	5,47	0,91



Мониторинг оседания поверхности и снижения уровня грунтовых вод проводится Ханойским институтом строительства и технологий (НИВТ) на 10 наземных станциях. Расположение и внешний вид этих станций показаны на рис. 1–3. В таблице 1 и на рис. 4 приведены данные по снижению уровня грунтовых вод за период с 1994 по 2004 год.

Снижение уровня подземных вод приводит к существенному росту эффективных напряжений, что определяет уплотнение слабых песчано-глинистых пород и

деформации земной поверхности, а также развитие дополнительных осадок построенных зданий и подземных сооружений. Например, формирование обширной пьезометрической депрессии на площади до 250 км² с максимальным понижением уровня до 32 м за счет откачки подземных вод привело к осадке земной поверхности [6].

Максимальные величины оседаний существенно различаются в отдельных районах города: они составляют, например, 147,7 мм («Хадинь», 1994–2004 гг.),

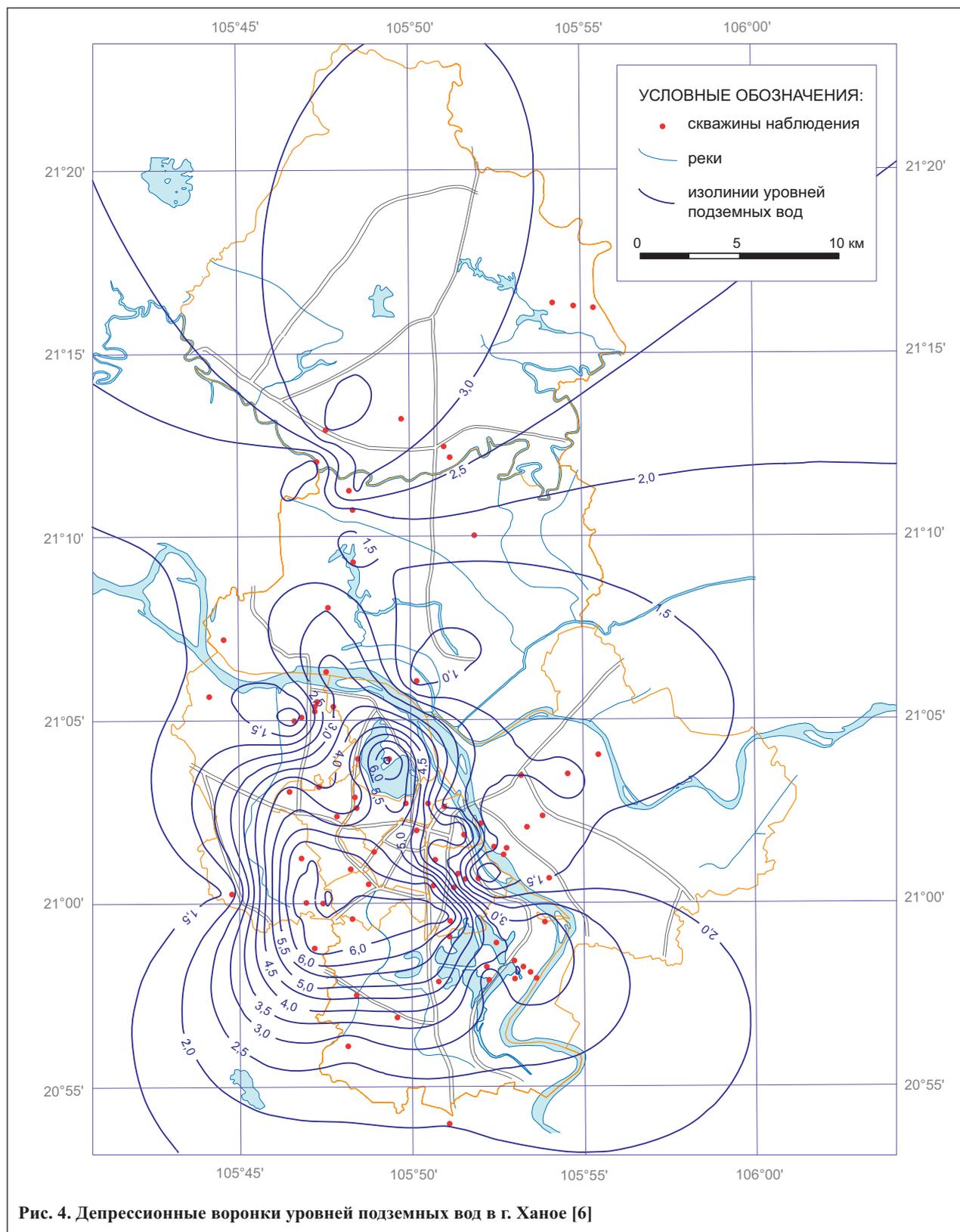


Рис. 4. Депрессионные воронки уровней подземных вод в г. Ханое [6]



Рис. 5. Трещины на стене



Рис. 6. Отрыв ступеней от здания

221,7 мм («Фапван», 1994–2004 гг.) и 372,8 мм («Тханьконг», 1994–2004 гг.), что соответствует величинам водопонижения до 5,3; 4,7 и 10,7 м соответственно.

Величина оседания земной поверхности в большей степени зависит от мощности малолитифицированных сжимаемых озерно-болотных отложений свиты Хайхынг ($lbIV^{1-2}hh_1$). В связи с этим мощность слабых грунтов $lbIV^{1-2}hh_1$ варьирует, например, от 6 до 12 м на участке «Хадинь», от 8 м до 18 м на участке «Тханьконг» и от 6 до 27 м на участке «Фапван».

Длительные и неравномерные осадки характерны для 4–6-этажных зданий, построенных в 70–80-х годах прошлого века на фундаментах неглубокого заложения и иногда на пирамидальных сваях (до 3,6 м) в жилых микрорайонах города, в которых широко развиты сла-

бые водонасыщенные грунты с органическими остатками свиты Хайхынг ($lbIV^{1-2}hh_1$). Величина осадок зданий варьирует от 100 до 400 мм, в отдельных случаях превышает 1200 мм. В качестве примеров можно привести осадки пятиэтажных панельных зданий, построенных в конце 1970-х годов на территории Ханоя в микрорайонах Куньмай, Жангво, Нгокхань, Танмай, Тханьконг и др. (рис. 5–10).

Анализ данных мониторинга оседания поверхности и снижения уровня грунтовых вод позволил сделать следующие выводы:

- с течением времени скорость снижения уровня подземных вод на всех станциях линейно увеличивается;
- на большинстве станций отчетливо фиксируются сезонные изменения уровня подземных вод;



Рис. 7. Расхождение деформационного шва



Рис. 8. Трещина по деформационному шву

Характеристика грунтов для станции «Тханьконг» [8]										
Стр.-ген. комплекс	№ слоя	Тип грунта	Описание	Глубина залегания h , м	Влажность W , %	Плотность γ , кН/м ³	Коэффициент консолидации C_v , м ² /год	Степень переуплотнения OCR	Коэффициент уплотнения CR^*	Коэффициент разуплотнения RR^{**}
$t Q_{IV}$	1	Техногенный грунт	Насыпной, желтовато-серый, с гидроокислами железа и линзами песка	0–3	30,0	19,0	2,0	7,00	0,30	0,06
Свита Тхайбинь ($aIV^3tb_{1,2}$)	2	Супесь	Твердая, розовато-бурая или коричневатая-серая	3–7	31,0	18,7	2,5	3,59	0,12	0,03
Свита Хайхынг ($bIV^{1-2}hh_1$)	3	Супесь	От пластичной до твердой, голубовато-серая или коричневатая-серая	7–23	46,6	16,2	2,6	1,21	0,38	0,05
Свита Виньфук ($aIII^2vp_1$)	4	Песок	Средней плотности, мелкозернистый, серый или желтовато-серый	23–33	-	-	-	-	-	-

* $CR = C_c / (1 + e_0)$, где C_c — коэффициент компрессии, e_0 — коэффициент пористости.
 ** $RR = C_r / (1 + e_0)$, где C_r — коэффициент рекомпрессии.

- максимальные сжатия слоев грунта по всему разрезу зафиксированы на станции «Тханьконг», в меньшей степени — на станциях «Хадинь», «Фапван», «Льонгйен»;
- величина оседания земной поверхности зависит от мощности малолитифицированных сжимаемых грунтов.

Для выполнения моделирования оседания поверхности были собраны данные о составе, строении и свойствах грунтов по 18 скважинам и построено 5 опорных разрезов. В строении разреза по линии «Майзич — Хадинь — Фапван» принимают участие следующие стратиграфические комплексы:

- современные техногенные отложения;
- аллювиальные и аллювиально-озерно-болотные отложения свиты Тхайбинь;
- озерно-болотные отложения свиты Хайхынг;
- позднелейстоценовые аллювиальные, озерные и озерно-болотные отложения свиты Виньфук;
- средне-позднелейстоценовые аллювиальные и аллювиально-пролювиальные отложения свиты Ханой.

Высокой и неравномерной сжимаемостью обладают мягкопластичные суглинки и супеси свиты Хайхынг. Мощность этого слоя увеличивается с севера на юг и на станции «Нго Си Лянь» достигает 13 м, на станции «Тханьконг» — 15 м, на станции «Хадинь» — 22 м.



Рис. 9. Отрыв пристроенной части



Рис. 10. Неравномерные осадки здания



Для прогноза оседания поверхности на ближайшие 25 лет были выбраны два участка — «Тханьконг» и «Хадинь». Для моделирования использовался программный комплекс TZP [2]. Характеристики грунтов, использованные при моделировании, приведены в таблице 2. Слои

глинистых грунтов были разбиты на 23 узла и 22 линейных элемента (1 элемент на 1 м). Результаты моделирования показаны на рис. 11 и в табл. 3. Отметим, что для станции «Тханьконг» в качестве точки отсчета был принят 1986 год, когда стали заметны оседания поверхности.

Таблица 3

Расчетные значения понижения уровня подземных вод по данным станции «Тханьконг» на ближайшие 25 лет (в зависимости от добычи подземных вод согласно [7])											
Год	1986	1996	2000	2003	2006	2008	2013	2018	2023	2028	2036
Снижение уровня подземных вод, м	0	8,90	12,46	15,13	17,80	19,58	20,41	21,39	21,92	22,25	22,60

Таблица 4

Характеристика грунтов для станции «Тханьконг» [8]										
Стр.-ген. комплекс	№ слоя	Тип грунта	Описание	Глубина залегания h , м	Влажность W , %	Плотность γ , кН/м ³	Коэффициент консолидации C_v , м ² /год	Степень переуплотнения OCR	Коэффициент уплотнения CR^*	Коэффициент разуплотнения RR^{**}
$t Q_{IV}$	1	Техногенный грунт	Насыпной, желтовато-серый, с гидроокислами железа и линзами песка	0–1	30,0	19,0	2,5	5,0	0,15	0,04
Свита Тхайбинь ($aIV^3tb_{1,2}$)	2	Супесь	Твердая, розовато-коричневая или коричневатая-серая	1–5	31,0	18,7	2,5	3,59	0,12	0,03
	3	Песок	Средней плотности, тонкозернистый, от коричневатого-серого до серовато-черного	5–14	26,0	19,0	5,0	5,0	0,09	0,02
Свита Хайхынг ($lbIV^1-2hh_1$)	4	Супесь	От пластичной до твердой, голубовато-серая или коричневатая-серая	14–36	46,6	16,2	5,0	1,15	0,38	0,05
Свита Виньфук ($aIII^2vp_1$)	5	Супесь	Твердая, коричневатая или голубовато-серая с крапинками	36–39	26,0	18,6	1,8	2,77	0,10	-
Свита Ханой ($a,apII-III^1hm$)	6	Гравий	Плотный, серый	39–42	-	-	-	-	-	-

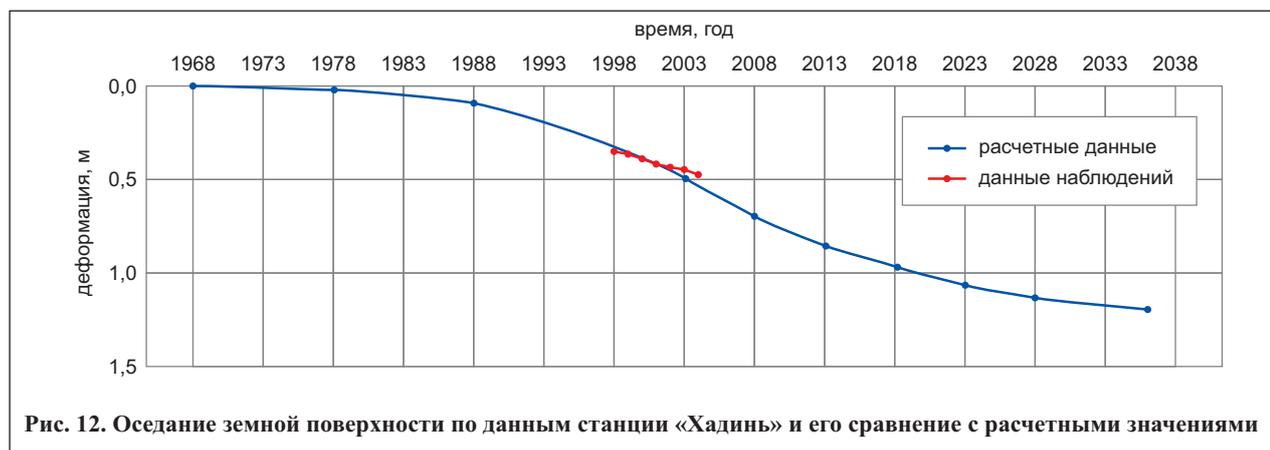


Рис. 12. Оседание земной поверхности по данным станции «Хадинь» и его сравнение с расчетными значениями

Таблица 5

Расчетные понижения уровня подземных вод по данным станции «Хадинь» на ближайшие 25 лет (в зависимости от добычи подземных вод, согласно [7])

Год	1968	1978	1988	1998	2003	2008	2013	2018	2023	2028	2036
Снижение уровня подземных вод, м	0	4,8	9,6	14,4	16,8	19,2	20,86	21,86	22,59	22,95	23,30

Выполненное моделирование оседания поверхности вследствие извлечения подземных вод показало, что 96% от общей величины осадки составляет сжатие мягкопластичных глинистых грунтов. Сравнение расчетных данных с данными натурных наблюдений (см. рис. 11) показало, что фактическая скорость оседания на станции «Тханьконг» меньше расчетной.

На станции «Хадинь» ввод водозабора был осуществлен в 1968 году, снижение уровня грунтовых вод в настоящее время составило более 20 м. Характеристики грунтов для этой станции, используемые при моделировании, приведены в табл. 4. Результаты моделирования представлены на рис. 12 и в табл. 5.

Сжатие мягкопластичных глинистых грунтов составляет 85,8% от общей величины деформаций. Величина сжатия в этом слое может достигать до 6,2 см на 1 м. На рисунке 13 показано сравнение расчетных данных с результатами мониторинга на станции «Хадинь» в период с 1997 по 2004 год. Фактическая скорость оседания меньше расчетной.

Выводы

1. Выполнено прогнозирование оседания дневной поверхности, вызванного откачкой подземных вод в микрорайонах Тханьконг и Хадинь с помощью программы TZR [2]. Результаты расчетов осадки показали неплохое соответствие данным мониторинга. Рекомендуется использовать эту методику для прогнозирования осадок поверхности в других районах г. Ханоя. Результаты анализа также показали, что сжатие мягкопластичных глин составляет более 85% от величины осадки.

2. Подземное пространство г. Ханоя представлено сильносжимаемыми грунтами, в том числе глинами с органическими включениями, илами, торфами. Извлечение подземных вод в г. Ханое непрерывно увеличивается, особенно в последние 15 лет (с 40 тыс. м³/сут в 1950 г. до более чем 1 млн м³/сут в 2011 г.) Уровень грунтовых вод снизился с 2–4 до 14–16 м от

поверхности земли. Сочетание этих двух факторов приводит к значительным осадкам поверхности, вызывая деформации инженерных сооружений и коммуникаций.

3. С целью решения этой проблемы необходимо предпринимать эффективные меры, например устраивать новые водозаборы в менее опасных зонах, использовать для водоснабжения города поверхностные воды и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мань Н.Д. Инженерно-геологическое обеспечение освоения подземного пространства г. Ханоя (Вьетнам): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. СПб., 2010. 24 с.
2. Giao P.H., Phien-wej N. A FEM programme for land subsidence analysis // Proceedings of the International Workshop «Hanoi Geoengineering 2003–2004». Hanoi, Vietnam: Vietnam National University Publishing House, 2004. P. 77–82.
3. Minh N.N. Review and analysis Hanoi land subsidence monitoring data / Master thesis. Bangkok, Thailand: Asian Institute of Technology, 2008. 142 p.
4. Phai V.V. Geology, geomorphology and mineral resources of Hanoi City, Vietnam. Hanoi: Hanoi Publishing House, 2010. 280 p.
5. Poland J.F. Guidebook to studies of subsidence due to groundwater withdrawal / For the International Hydrological Programme, Working Group 8.4. Chelsea, Michigan, USA: Book Crafters, 1984. ISBN 92-3-102213-X. 340 p.
6. Report on groundwater level monitoring in Hanoi, Vietnam / For the Northern Division of Water Resources Planning and Investigation (NDWRPI). Hanoi, Vietnam: NDWRPI, 2004. 26 p.
7. Report on prediction of groundwater level in Hanoi / For the Hanoi Water Business Company (HWBC). Hanoi, Vietnam: HWBC, 2009. 84 p.
8. Report on Research programme on Hanoi land subsidence due to changing of groundwater level / For the Hanoi Institute of Building Technology (HIBT). Hanoi: HIBT, 2004. 125 p.
9. Terzaghi K. Simplified soil test for subgrade and their physical significance // Public Roads. 1925. V. 7. P. 153–162.
10. Toan D.T. Hanoi land subsidence with reference to development of a proper monitoring network / Master thesis № GE-04-20. Bangkok, Thailand: Asian Institute of Technology, 2005. 124 p.