

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131

КАРТЫ ПРОГНОЗА ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРОДЕ ХАНОЕ (ВЬЕТНАМ)

© 2016 г. Х. Т. Фи*, Л. А. Строкова**

Ханойский университет транспорта и коммуникаций,

E-mail: phthinh.tomsk@gmail.com

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск,
634050 Россия. E-mail: sla@tpu.ru*

Поступила в редакцию 19.08.2015 г.

После исправления 27.10.2015 г.

Рассмотрены результаты прогрессирующих оседаний земной поверхности, вызванных консолидацией сжимаемых водоносных слоев в результате извлечения подземных вод в г. Ханое (Вьетнам). Исследования включали сбор и анализ данных по геологии, гидрогеологии, свойствам грунтов и наблюдаемым осадкам по 10 станциям мониторинга. Описаны гидрогеологические особенности территории. Выполнен прогноз изменения уровня подземных вод в ближайшие 17 лет в результате нарастающего извлечения подземных вод. Составлены прогнозные карты уровня подземных вод плейстоценового комплекса на территории г. Новый Ханой. Выполнено моделирование развития осадков во времени по 92 точкам методом конечных элементов. Построены прогнозные карты оседания поверхности на 2020 и 2030 гг. В настоящее время в центральной части города, где присутствуют слабые грунты мощностью больше 5 м, оседание поверхности составляет 30–104 см. Максимальные оседания поверхности зафиксированы в центре депрессионной воронки. На окраинах воронок и вдоль рек Красной и Дуонг оседание поверхности составляет 0–30 см, хотя в разрезе некоторых микрорайонов и присутствуют слабые водонасыщенные грунты. К 2030 г. площадь зон оседания поверхности будет расширяться, величина оседания поверхности увеличится незначительно – от 1 до 15 см (в среднем 6 см), скорость оседания значительно снизится. Предложены рекомендации по зонированию потенциальной добычи подземных вод на территории города.

Ключевые слова: Ханой, грунты, оседание поверхности, осадка, извлечение подземных вод, моделирование.

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, Мехико – 8 м, 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.

Город Ханой – один из крупнейших мегаполисов Азиатского региона с развитой промышленностью, инфраструктурой, высокой плотностью населения. После расширения административного образования в августе 2008 г. площадь Нового Ханоя 3324.92 кв. км, население 6.3 млн человек. Добыча подземных вод для водоснабжения города

составляет более 1 млн м³/сут. Водопотребление в г. Ханое ежегодно увеличивается. Непрерывный рост дебита водозаборных скважин вызывает образование депрессионных воронок с понижением уровня в ряде зон: от 13 до 18 м (Тханьконг, Нгосильен, Донтхуй, Натывонг и др.); от 18 до 32 м (Майзич, Нгокха, Хадинь, Тхьонгдинь, Танчьеу, ДайКим, Фапван и др.). Расположение г. Ханоя на особо сложной природной территории, активное проявление опасных геологических процессов природного и техногенного характера и широкое (30% площади) распространение слабых грунтов создают большие трудности при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений [1–3].

Оседание земной поверхности в связи с интенсивным извлечением подземных вод – один из опасных геологических процессов на территории

Таблица 1. Обобщенные показатели состава и свойств четвертичных отложений территории Ханоя по данным Х.Т. Фи, полученным в 2013 г. [2]

№ слоя	Возраст и литологическое описание отложений	Природная влажность W , %	Плотность грунта ρ , г/см ³	Число пластичности I_p , %	Показатель текучести I_L отн. ед.	Угол внутреннего трения φ , град.	Удельное сцепление c , кПа	Модуль деформации $E_{(0,1-0,2)}$ МПа	Несущая способность R_0 , кПа	Содержание органических веществ O , %	Количество образцов
1	Техногенные отложения (тН). Пески, суглинки и супеси с примесью строительного мусора (обломки кирпича, камней, извести, строительных растворов и пр.)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Свита Тхайбинь:											
верхняя пачка (aIV³tb₂)											
2	Суглинистый ил (донные отложения озер и прудов)	55.8	1.64	16.9	1.12	5	7.1	1.6	50	–	52
3	Коричневые и розовато-коричневые мягкопластичные суглинки, перемежающиеся с супесями	32.6	1.79	15.6	0.58	10	16.5	6.9	120	–	29
4	Водонасыщенный буровато-серый мелко- и тонкозернистый рыхлый песок, местами с гравием	–	–	–	–	25	–	7.2	100	–	16
нижняя пачка (alb, aIV³tb₁)											
5	Желтовато-серая глина от тугопластичной до мягкопластичной	32.8	1.85	19.0	0.35	10	29.3	11.1	170	–	87
6	Желтовато-серые и коричневые суглинки от тугопластичных до мягкопластичных	29.1	1.89	14.3	0.37	12	26.8	11.6	170	–	733
7	Водонасыщенные серо-коричневые суглинки от текуче-пластичных до текучих с органическими остатками	42.6	1.72	14.8	0.89	7	12.0	4.0	70	5.7	385
8	Серо-коричневые мягкопластичные суглинки, перемежающиеся с супесями и песками	31.2	1.82	9.7	0.74	12	14.7	7.6	110	–	249
9	Водонасыщенные зеленовато-серые мелко- и тонкозернистые пески средней плотности	–	–	–	–	27	–	10.7	130	–	545
10	Серо-коричневые мягкопластичные суглинки, перемежающиеся с супесями и песками	34.3	1.74	12.1	0.73	10	16.1	5.4	110	–	89
Свита Хайхынг											
верхняя пачка (ambIV¹⁻²hh₃)											
11	Водонасыщенные темно-серые суглинки от текуче-пластичных до текучих с органическими остатками	40.1	1.76	15.6	0.96	6	9.6	3.4	60	12.2	27

ФИ, СТРОКОВА

12	Синие глины от тугопластичных до мягкопластичных	средняя пачка (mIV ¹⁻² hh ₂)										163
		35.1	1.80	18.6	0.47	10	24.2	8.9	140	5.3		
		нижняя пачка (lbIV ¹⁻² hh ₁)										
13	Темно-серый суглинистый ил с органическими остатками	53.3	1.61	15.9	1.26	5	9.1	1.6	50	9.7	628	
		Свита Виньфук										
		верхняя пачка (a,amIII ² vp ₃)										
14	Светло-серые и желтовато-серые тугопластичные глины	30.6	1.87	18.5	0.25	12	30.8	15.2	180	—	196	
15	Разноцветные (коричневые, желтые, красные) суглинки от полутвердых до тугопластичных	26.6	1.92	13.9	0.28	14	30.4	14.8	210	—	608	
		средняя пачка (albII ² vp ₂)										
16	Темно-серые суглинки от текучепластичных до текущих с органическими остатками	36.4	1.76	12.8	0.88	10	12.0	4.9	90	8.0	54	
		нижняя пачка (aIII ² vp ₁)										
17	Желтовато-серые пластичные супеси, перемежающиеся с суглинками или песками	26.0	1.85	7.5	0.77	15	14.5	11.5	140	—	167	
18	Водонасыщенные коричневые и желтовато-коричневые мелко- и тонкозернистые пески от средней плотности до плотных	—	—	—	—	33	—	19.8	290	—	195	
19	Водонасыщенные желтовато-серые и светло-серые средне- и крупнозернистые пески от плотных до очень плотных, местами с гравием и галькой	—	—	—	—	36	—	30.1	370	—	215	
		Свита Ханой (ар, ал-III ¹ hn)										
20	Серо-коричневые мягкопластичные суглинки, местами с органическими остатками	27.3	1.84	10.8	0.59	9	18.2	7.0	120	—	8	
21	Серая пластичная супесь, местами с гравием	—	—	—	—	—	—	12.4	180	—	10	
22	Водонасыщенные галечно-гравийные отложения, местами серые и желтовато-серые очень плотные крупнозернистые пески	—	—	—	—	—	—	>50.0	>500	—	80	
		Свита Лэчи (allc)										
23	Серые и коричневые пластичные супеси, местами с гравием	—	—	—	—	—	—	15.0–20.0	>200	—	—	
24	Водонасыщенные галечно-гравийные отложения, мелко- и крупнозернистые коричневатого-серые и желтовато-серые очень плотные пески с суглинками	—	—	—	—	—	—	>50.0	>500	—	—	

г. Ханоя, который провоцирует осадку и разрушение зданий и объектов инфраструктуры.

Оценка и прогноз этого явления на территории города имеют большое значение для предупреждения и уменьшения его вреда в отношении гражданских и промышленных сооружений. Вопросам оседания поверхности, связанного с интенсивным забором подземных вод, посвящены работы К. Терцаги, Дж. Поланд, П. Жао, Т. Ты, Д. Фредланд, Дж. Ли, Р. Гибсон и многих других [5, 6, 9–11], в частности на территории г. Ханоя исследования Ф.Х. Жао, Ч.М. Тху, Ч.М. Льеу, Н.Х. Фьонг, Л.Ч. Тхань, Ч.В. Ты, Т.Т. Дьонг [4] и др. Актуальные задачи в настоящее время – выделение подверженных оседанию территорий и прогноз изменения площадей деформаций в будущем.

Цель настоящей работы – прогноз осадок на территории г. Ханоя (Вьетнам) и их картографирование. Основная трудность в достижении поставленной цели заключается в том, что необходимо решать две относительно самостоятельные группы задач:

– гидрогеологические задачи для оценки и прогноза изменения уровня грунтовых вод;

– инженерно-геологические – для оценки и прогноза осадок земной поверхности геологической среды с учетом состава, строения и свойств грунтов, ее составляющих.

Исследование оседания земной поверхности, вызванного откачками подземных вод, проводилось путем сбора и анализа данных по геологии, гидрогеологии, свойствам грунтов и наблюдаемым осадкам и моделирования величины оседания при прогрессирующем извлечении подземных вод. При обработке, анализе и интерпретации данных наблюдений использовались программы “MS Excel”, “AutoCAD”, “Visual ModFlow”, “Mapinfo” и др.

Анализ данных по геологии района. В разрезе четвертичных отложений выделяют пять свит, различающихся по возрасту и генезису (снизу вверх): ранний плейстоцен – аллювиальные отложения (свита Лэчи – *allc*); средне-поздний плейстоцен – аллювиальные и аллювиально-пролювиальные (свита Ханой – *a,apII-III¹hn*); поздний плейстоцен – аллювиальные, озерные и озерно-болотные отложения (свита Виньфук – *a,l,lbIII²vp_{1,2,3}*); ранний и средний голоцен – озерно-болотные, морские и болотные отложения (свита Хайхынг – *lb,m,bIV¹⁻²hh_{1,2,3}*); поздний го-

лоцен – аллювиальные и аллювиально-озерно-болотные отложения (свита Тхайбинь – *a,albIV³tb_{1,2}*).

Анализ физико-механических свойств четвертичных отложений территории Ханоя [2] позволил разделить их на 24 слоя. Обобщенные показатели состава и свойств четвертичных отложений территории Ханоя приведены в табл. 1.

Отложения верхней части разреза (свиты Виньфук, Хайхынг и Тхайбинь) – **слабые группы** с низкой несущей способностью и высокой сжимаемостью ($R_0 < 100$ кПа и $E_{0(0.1-0.2)} < 5$ МПа, соответственно). Их мощность изменяется от 0.2 до 43.0 м; глубина залегания – от 0 до 37.8 м. Они широко распространены в центральной части и южных районах города.

Анализ данных по гидрогеологии района и наблюдаемым осадкам. По данным гидрогеологической службы Ханоя [7], в городе существуют три основные формы водозабора подземных вод: общественные, промышленных предприятий и частные. В городе действуют 10 крупных и 11 мелких общественных предприятий, занимающихся обеспечением населения водой (так называемые станции водоснабжения). Они состоят из 164 скважин, пробуренных на плейстоценовый водоносный горизонт, со средней мощностью 667 804 м³/сут. (данные 2008 г.). Для водоснабжения промышленных предприятий в общей сложности действуют 513 скважин. Скважины пробурены на плейстоценовый водоносный горизонт на глубину от 32 до 85 м при средней производительности 152 000 м³/сут. (данные 2008 г.). Частных водозаборных скважин – 110 902. Глубина небольшая, используется голоценовый водоносный горизонт или верхняя часть плейстоцена. Общая производительность этих скважин – 110 900 м³/сут. (данные 2008 г.).

Общая добыча подземных вод в 2008 г. составила 930 704 м³/сут. В дальнейшем суточный расход воды увеличится до 950–1050 тыс. м³/сут. к 2015 г. и до 1180–1250 тыс. м³/сут. к 2020 г. Большая часть воды забирается из плейстоценового водоносного горизонта.

Мониторинг за оседанием поверхности и снижением уровня грунтовых вод проводится Ханойским институтом строительства и технологий (НИВТ) по 10 наземным станциям [8]. Результаты мониторинга за оседанием земной поверхности за период 1994–2004 гг. показали, что почти вся внутренняя площадь Ханоя оседала с разной скоростью, зависящей от инженерно-геологических условий и характеристик понижения подземных вод. Максимальная скорость и величина оседа-

Таблица 2. Данные наблюдений за оседанием поверхности и снижением уровня подземных вод по 10 станциям мониторинга [8]

Станция	Период проведения мониторинга оседания земной поверхности, гг.	Мощность слабых грунтов, м	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	–	18.99	1.80	1994–2008	4.18	0.28
Фапван (Phap Van)	1996–2005	26.0	189.14	22.17	1996–2008	4.66	0.36
Тханьконг (Thanh Cong)	1996–2004	16.0	323.67	41.42	1997–2008	10.69	0.89
Хадинь (Ha Dinh)	1997–2004	23.7	131.83	18.46	1998–2008	5.32	0.48
Майзич (Mai Dich)	1997–2004	–	19.67	2.65	1998–2008	6.88	0.63
Льонгиен (Luong Yen)	1999–2004	14.0	79.70	18.46	2000–2008	7.56	0.84
Донган (Dong Anh)	2002–2004	–	13.98	1.41	2002–2008	1.12	0.16
Нгошильен (Ngo Si Lien)	2002–2004	12.5	79.56	31.52	2002–2008	4.12	0.59
Залам (Gia Lam)	2002–2004	2.1	38.26	10.33	2003–2008	1.50	0.25
Тьонгмай (Tuong Mai)	2002–2004	15.5	36.85	15.34	2003–2008	5.47	0.91

ния отмечены на участках с высокой скоростью понижения подземных вод, в разрезе которых присутствуют слабые грунты с мощностью более пяти метров (табл. 2). Максимальное количество разрушающихся зданий и сооружений в Ханое приурочены к зонам депрессионных воронок. В период интенсификации добычи подземных вод (1985–1995 гг.) порядка 200 зданий 4–5 этажей, постройки 1960–1985 гг. на фундаментах неглубокого заложения осели, с величиной осадки 10–40 см. В отдельных случаях величина осадки зданий составляла 120–200 см. Согласно результатам исследования Ч.В. Ты, величина оседания поверхности от двухэтажных зданий (17.59 кПа) и пятиэтажных (35.18 кПа) на плитных фундаментах в районе Хадонг составляет, соответственно, 15 и 35 см.

Таким образом, интенсивность оседания земной поверхности зависит прежде всего от объемов добычи подземных вод, состава, мощности и физико-механических свойств грунтов, а также нагрузок от зданий и сооружений.

Анализ данных мониторинга за оседанием поверхности и снижением 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 грунтовых вод;
- максимальные сжатия слоев грунта по всему разрезу зафиксированы на станции Тханьконг, в меньшей степени на станциях Хадинь, Фапван, Льонгиен;
- величина оседания земной поверхности зависит от мощности слабо литифицированных сжимаемых грунтов;
- в местах со слоями слабого грунта оседание земной поверхности является суммой осадки слоев слабых грунтов, залегающих выше слоя добычи подземных вод.

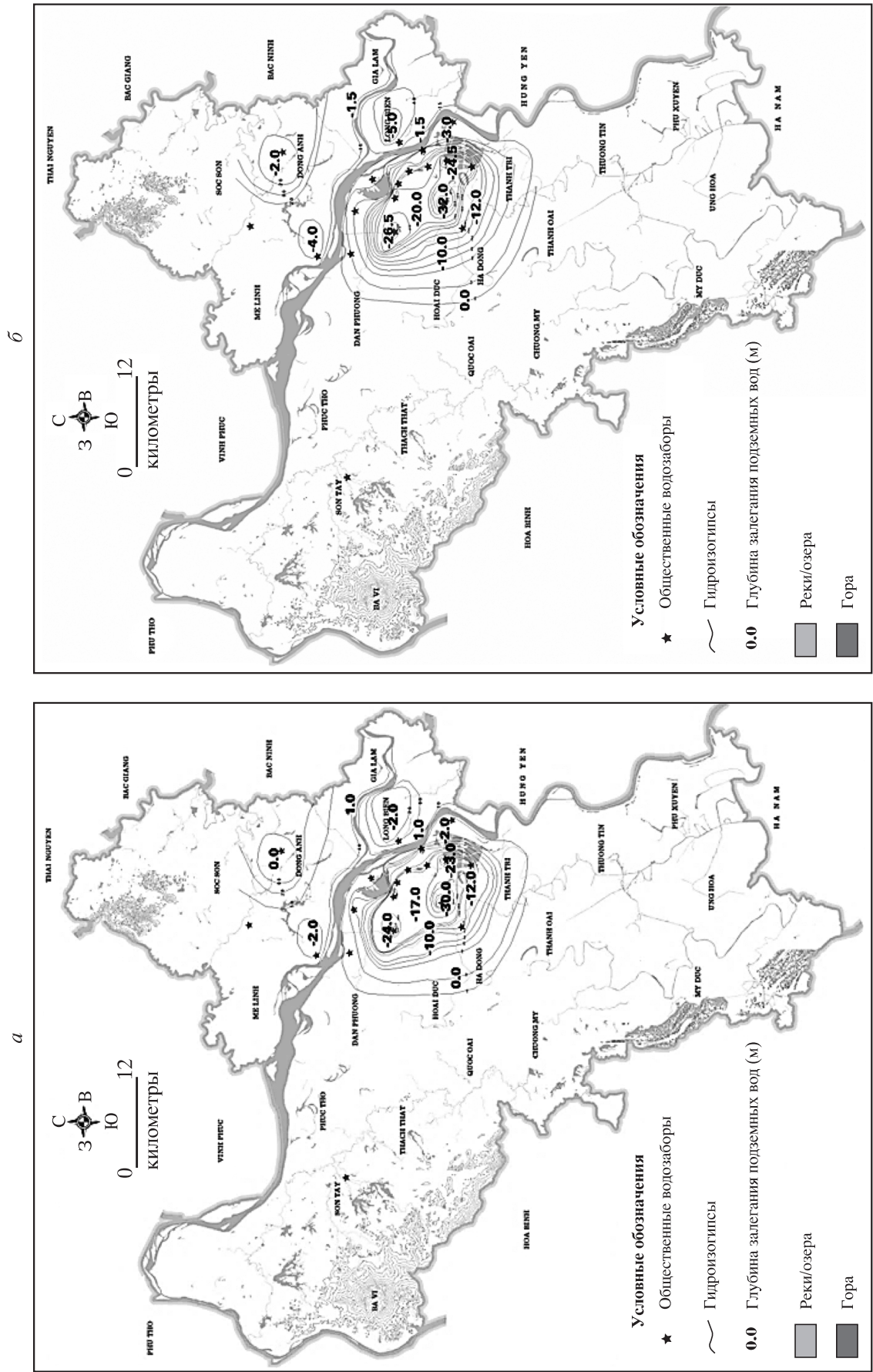


Рис. 1. Карты уровня подземных вод плейстоценового комплекса на территории г. Ханоя: а – в 2010 г., б – прогнозная (в 2030 г.) (Чиеу Д.Х., Фам Б.К., Фи Х.Т., 2013). Карты только в электронном виде.

Для прогноза оседания земной поверхности в связи с извлечением подземных вод рассмотрены две составляющие этого процесса: а) прогноз изменения уровней подземных вод; б) прогноз оседания грунтовой толщи вследствие изменения ее напряженно-деформированного состояния.

Прогноз понижения уровней подземных вод на территории г. Ханоя выполнялся с помощью программы Visual ModFlow v.4.2. По варианту извлечения подземных вод в 2010 г. (рис. 1а), в ближайшие годы уровень подземных вод на территории города не будет превышать допустимое понижение.

Но на станциях водоснабжения, находящихся далеко от Красной реки (Майзич, Тьонгмай, Фапван, Нгокха и особенно Хадинь), уровень подземных вод еще будет продолжать снижаться. В 2020 г. величина понижения уровня подземных вод плейстоценового комплекса будет составлять в Майзич 27.5 м и в Хадинь 32.0 м, а в 2030 г. – 28.5 и 32.8 м, соответственно. В качестве примера на рис. 1б приведена прогнозная карта уровня подземных вод плейстоценового водоносного комплекса для 2030 г.

Прогноз оседания поверхности. Решение задачи осуществляется при помощи множества экспериментальных и теоретических методов. В данном случае для моделирования развития величин осадок во времени в результате извлечения подземных вод применялись метод многофакторного корреляционного анализа (ММКА) и метод конечных элементов (МКЭ). Авторы использовали программу TZP, разработанную Ф.Х. Жао на

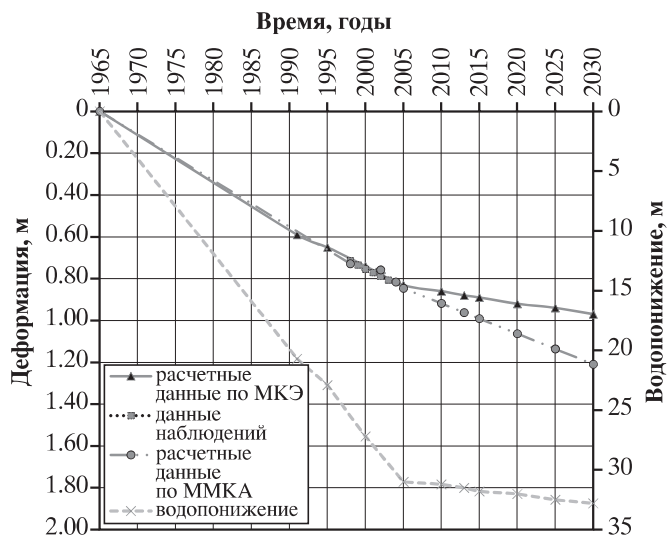


Рис. 2. Оседание земной поверхности по времени в связи с добычей подземных вод по станции Хадинь [1].

базе МКЭ [5]. Результаты проверки моделей по 10 наземным станциям мониторинга использовались для выбора оптимального метода прогноза осадки во времени [1, 3].

ММКА позволил количественно оценить влияние таких геотехнических факторов, как глубина подземных вод, коэффициент средней относительной сжимаемости, мощность слоев слабых грунтов, время и плотность природного грунта в формулах деформации земной поверхности во времени (St) в результате извлечения подземных вод. По МКЭ, слои грунтов разбивались на узлы

Таблица 3. Изменение размеров площади оседания к 2020 и 2030 гг. в сравнении с 2013 г.

Величина оседания поверхности, см	Площадь оседания поверхности	
	к 2020 г.	к 2030 г.
10–30	будет расширяться, особенно в зонах вокруг станций водоснабжения Донгань и Залам	будет продолжать расширяться в зонах вокруг станции водоснабжения Залам
30–60	будет расширяться на небольшой площади в зонах вокруг станций водоснабжения Майзич, Хадинь и Фапван	будет продолжать расширяться на небольшой площади в зонах вокруг станции водоснабжения Донгань, где существуют слабые грунты
60–90	не будет расширяться	будет продолжать расширяться на небольшой площади в зоне вокруг станций водоснабжения Майзич, Нгошилиен, Бачкхоа и Хадинь
90–120	будет расширяться на небольшой площади в зонах вокруг станций водоснабжения Хадинь и Тьонгмай	будет продолжать расширяться вокруг станций водоснабжения Хадинь, Тьонгмай, Фапван и микрорайоне Тханьконг; в этих зонах имеются слои слабых грунтов с мощностью больше 10 м

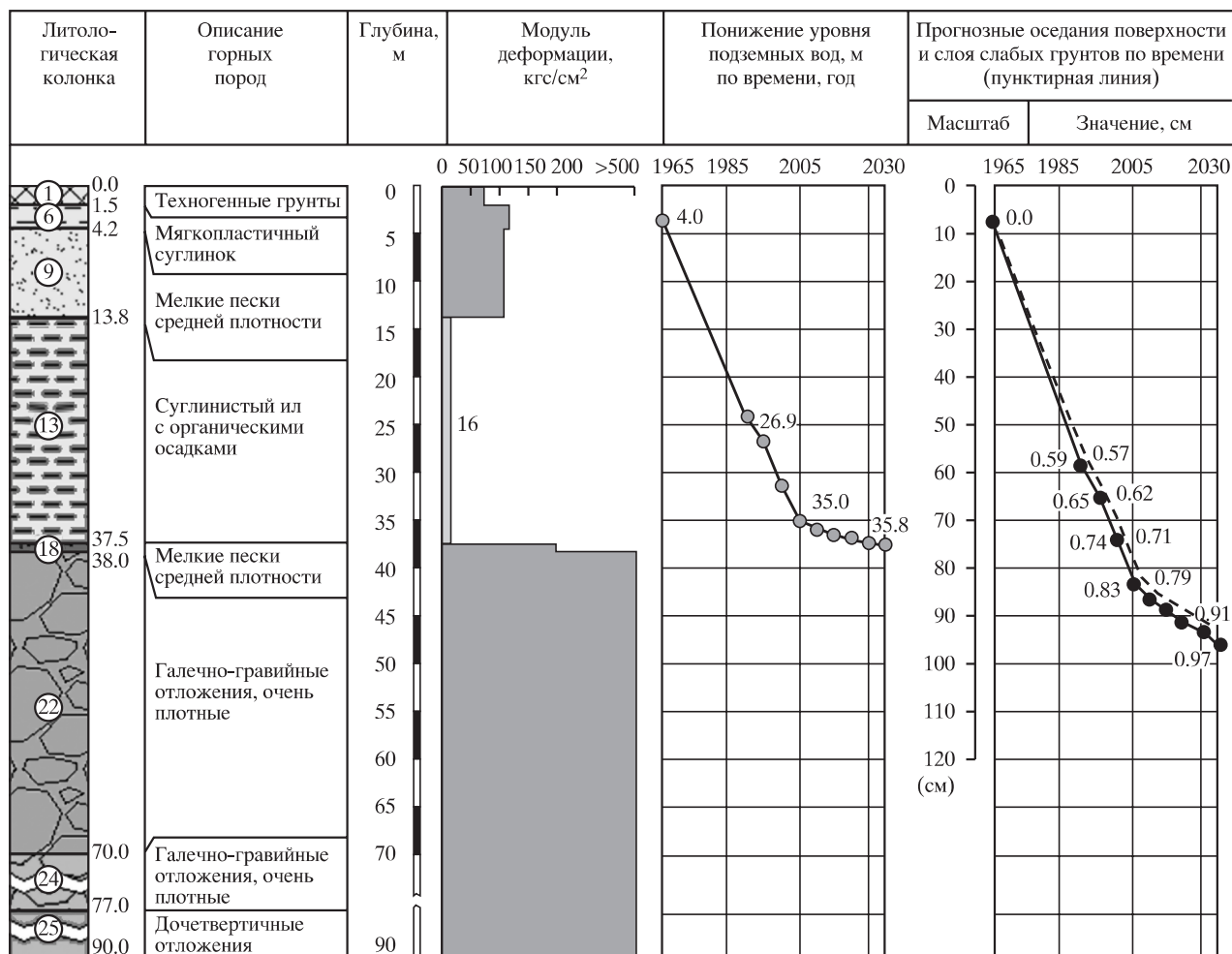


Рис. 3. График зависимости между оседанием поверхности и понижением уровня подземных вод на станции мониторинга Хадинь [1]. В том числе: черная линия – оседание поверхности; пунктирная линия – оседание слоя слабых грунтов № 13. Состав и физико-механические свойства других слоев приведены в табл. 1.

и линейные элементы; применялась модель одномерной консолидации; по изменению нейтрального напряжения была вычислена деформация во времени каждого подслоя грунта (St_i). На рис. 2 представлен результат расчета оседания поверхности на станции Хадинь двумя методами.

Прогноз оседания земной поверхности во времени St на станциях мониторинга за оседанием поверхности, выполненный с помощью обоих методов, дал результаты, относительно близкие к фактическим данным мониторинга. Сравнение между собой результатов, полученных этими двумя методами, показало, что на ближайшие годы результаты прогноза St по ММКА в среднем на 20–30% больше, чем результаты прогноза St по МКЭ. Причина этого отклонения может быть связана с коротким временем наблюдений и малым числом станций мониторинга. Поэтому для прогноза оседания использовался МКЭ в 92 точках

расчета. Расчеты показали, что 54–82% осадки от ее общей величины происходит за счет сжатия слабых грунтов свиты Хайхынг ($IbIV^{1-2}hh_1$).

Например, на рис. 3 представлен график зависимости между оседанием поверхности и понижением уровня подземных вод на станции мониторинга Хадинь. Ввод водозабора осуществлен в 1965 г., снижение уровня грунтовых вод в настоящее время составило 32 м. Слои грунтов были разбиты на 38 узлов и 37 линейных элементов (1 элемент на 1 м). Сжатие 13-го слоя (суглинистый ил с органическими остатками) составляет 95% от общей величины осадки.

Результаты расчета приведены на прогнозных картах оседания земной поверхности г. Ханоя в результате извлечения подземных вод в 2013, 2020 и 2030 гг. (рис. 4).

В 2013 г. оседание земной поверхности на всей площади депрессионной воронки палеогенового

a

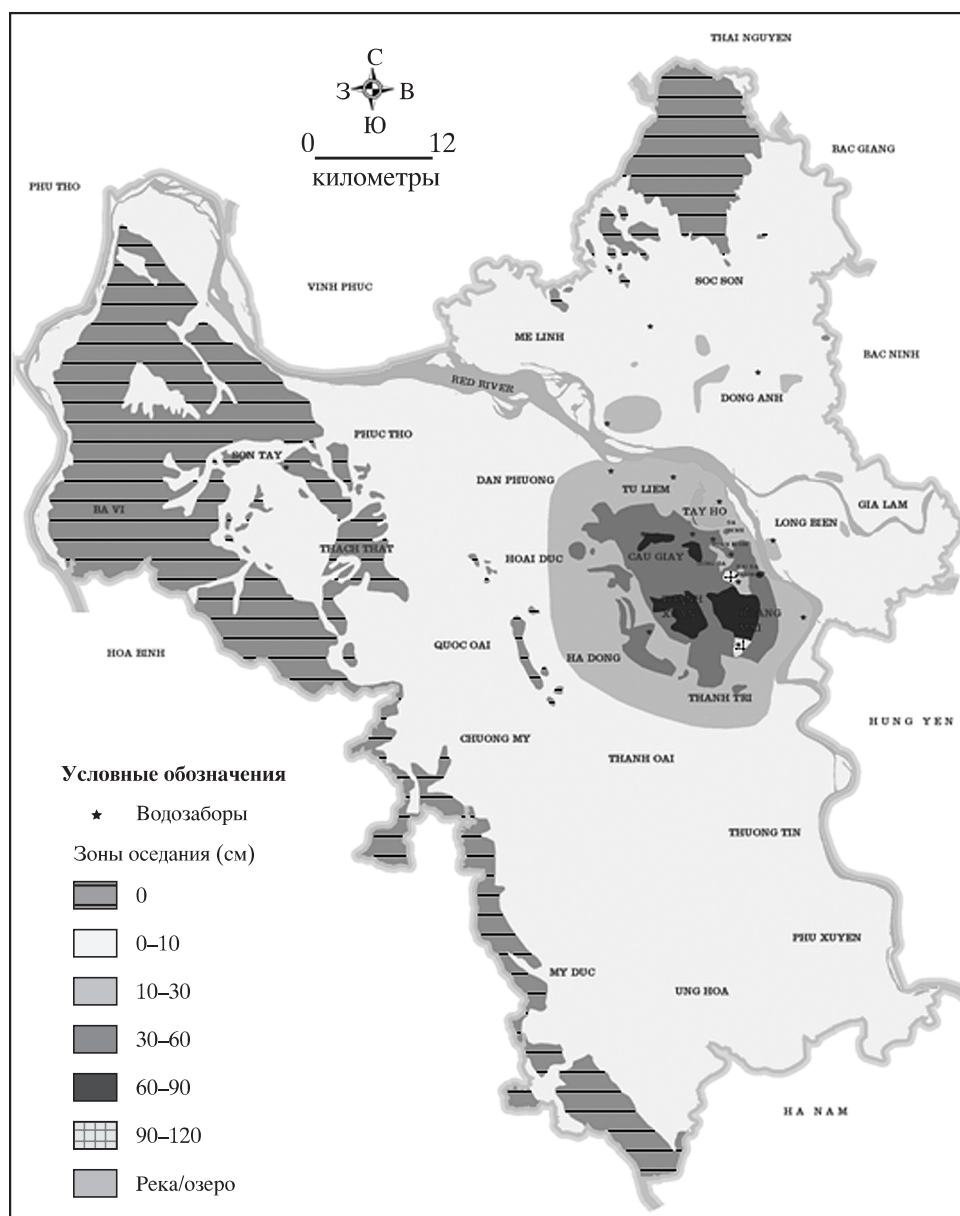


Рис. 4. Прогнозные карты оседания земной поверхности на территории г. Ханоя в результате извлечения подземных вод в: *a* – 2013 г., *б* – 2020 г., *в* – 2030 г. [1].

водоносного комплекса Qp составило более 10 см. В том числе в большей части районов Тханьсуан, Хоангмай, Хайбачынг и в части площади районов Донгда, Хоанкием, Бадинь, Таихо, Каузаи, Тылием и Тханьчи оседание поверхности составило более 30 см; в зонах вокруг станций водоснабжения Майзич, Фапван, Тьонгмай, Хадинь, Лыонгиен и микрорайона Тханьконг оседание поверхности составило 60–90 см. Значительные оседания произошли вблизи станций водоснабжения Бачкхоа (94 см) и Фапван (104 см). Эта зона находится в центральной части г. Ханоя, охватывает территорию водозаборов, является центром воронки

снижения уровня подземных вод палеогенового водоносного комплекса, здесь распространены грунтовые толщи с мощностью слабых грунтов больше 10 м. В центре депрессионной воронки величина оседания составляет более 60 см.

В периферийных зонах депрессионной воронки оседание поверхности составляет от 10 до 30 см, хотя в некоторых микрорайонах Лонгбиен, Тханьчи, Хадонг, Хоайдык в разрезе присутствуют слои слабых грунтов с мощностью больше 5 м.

В районах, которые находятся вне зоны депрессионной воронки, таких как Фусуен, Ынгхоа, Мидык,

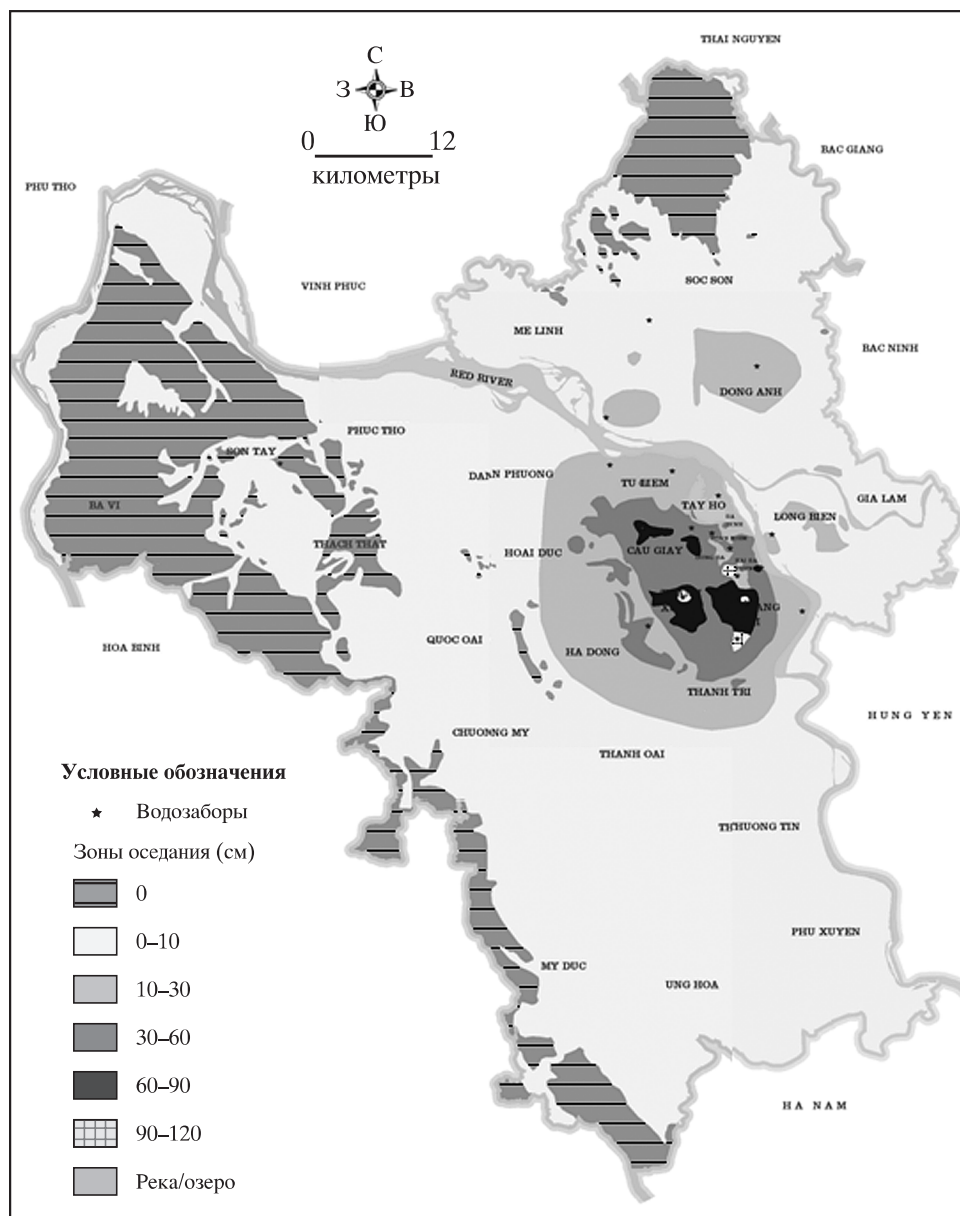


Рис. 4 (продолжение).

Тхьонгтин, Чьонгми, Куокоаи, Тханьоаи, Хоаидык, Данфьонг, Фуктхо, Мелинь, Донгань, Шокшон, Залам, Лонгбиен, прогнозируемое оседание поверхности составляет лишь от 0 до 10 см, хотя во многих районах также присутствуют слои слабых грунтов.

На большой площади районов Тылием, Таихо, Бадинь, Хоанкием, Хайбачынг, Хоангмай, Тханьчи, Лонгбиен, Донгань, Мелинь, находящейся вдоль берегов рек Красной и Дуонг (в разрезе отсутствуют слабые грунты или их мощность меньше 5 м), оседание поверхности составило 10–29 см, в среднем 12 см.

В зонах, сложенных с поверхности дочетвертичными отложениями, таких как Шокшон, Бави,

Шонтаи, Тхачтхат, и окраинные зоны на юго-западной части г. Ханоя, оседания поверхности в результате извлечения подземных вод не произойдет.

Величина оседания поверхности из-за добычи подземных вод на территории г. Ханоя с 2006 г. до настоящего времени составляет от 1 до 10 см, в среднем 4 см, что несколько меньше, чем в предыдущие годы.

Прогнозные данные об изменении размеров площади оседания к 2020 и 2030 гг. в сравнении с 2013 г. представлены в табл. 3. К 2020 и 2030 гг. площадь зон оседания поверхности будет расширяться, но величина оседания поверхности

6

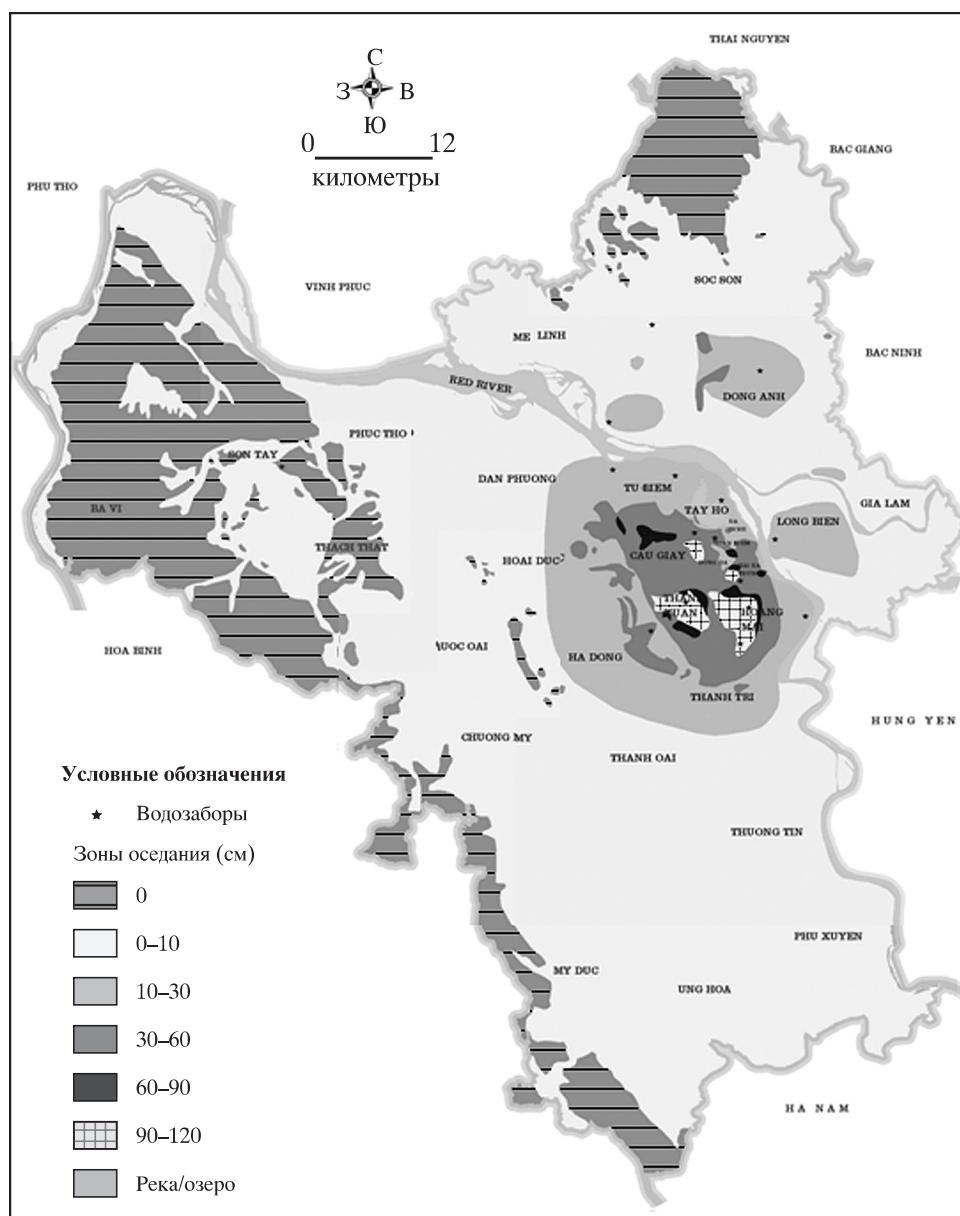


Рис. 4 (окончание).

будет увеличиваться незначительно, только от 1 до 15 см, в среднем 6 см. Скорость оседания значительно снизится. Величина оседания во многих разрезах будет достигать 60–80% от общего оседания.

РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для смягчения отрицательного влияния оседания земной поверхности следует предпринять некоторые меры:

– прекратить или снизить мощность добычи на станциях водоснабжения Хадинь, Майзич, Тьонгмай, Нгокха, Фапван, Бачкхоа, Мавзолей

президента Хошимина и Нгошилиен; мощность добычи на этих станциях необходимо пересмотреть;

– строить новые станции водоснабжения в менее опасных зонах. На базе результатов прогноза оседания земной поверхности, типизации грунтовых толщ (Фи Х.Т., 2013) и схемы зонирования модуля подземного стока на территории г. Ханоя (Конфедерация планирования и исследования водных ресурсов Северного региона Вьетнама, 2011) новые станции водоснабжения могут быть построены в зонах, которые показаны на схеме зонирования потенциальной добычи подземных вод (рис. 5). В их числе зона вдоль рек Красной

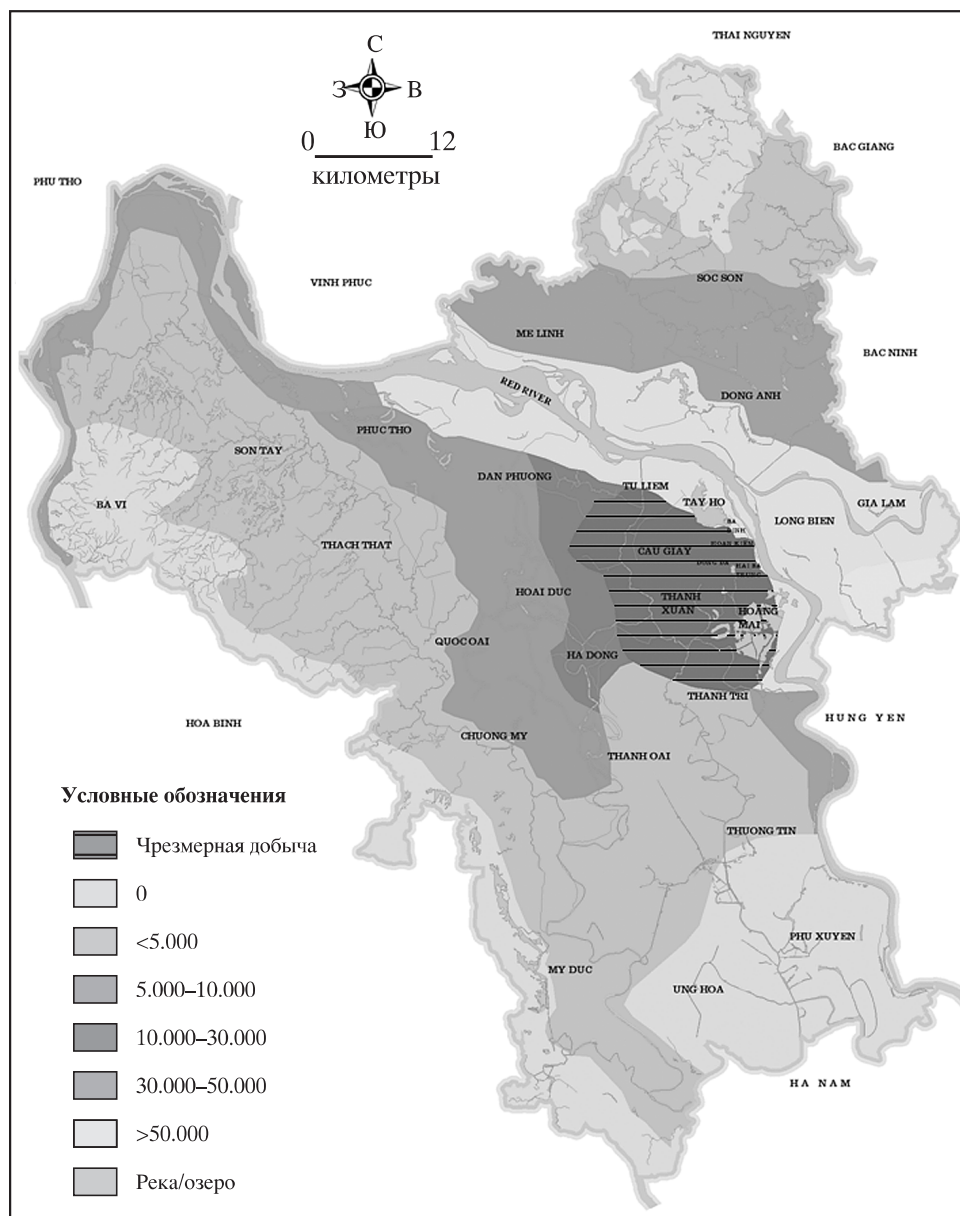


Рис. 5. Схема зонирования потенциальной добычи подземных вод палеогенового комплекса (КПИВРСРВ, с дополнениями по [1]).

и Дуонг – самая благоприятная для добычи подземных вод, здесь имеются “гидрогеологические окна”, и подземные воды постоянно пополняются водой из рек;

– использовать максимально мощность станции поверхностного водоснабжения “река Да”.

2. Нельзя строить станции поверхностного водоснабжения из рек Красной и Дуонг из-за плохого качества и загрязнения воды.

3. Необходимо построить другие станции для проведения мониторинга за оседанием поверхности на территории г. Ханоя, чтобы дополнить

данные мониторинга для своевременного и точного предупреждения оседания поверхности.

4. Оседание поверхности в результате извлечения подземных вод необходимо учитывать при планировании городского строительства и проектировании сооружений.

ВЫВОДЫ

Оседание земной поверхности есть результат механических процессов, в числе которых процессы фильтрационной консолидации и возможной ползучести слабых грунтов, связанных с изменением

гидродинамических условий водоносного комплекса из-за извлечения подземных вод.

Прогноз деформаций земной поверхности по времени S_t на станциях мониторинга за осадками поверхности, выполненный с помощью МКЭ и ММКА, дал результаты, относительно близкие к фактическим данным мониторинга. Таким образом, методы МКЭ и ММКА надежны и могут быть использованы для прогноза оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в Ханое.

Результаты прогноза показали:

1. В 2013 г. наибольшие величины оседания поверхности (30–104 см) зафиксированы на большей площади центральной части г. Ханоя. В этой зоне существует воронка снижения уровней подземных вод палеогенового водоносного комплекса, и большая часть ее площади сложена грунтами, в разрезе которых мощность слабых грунтов превышает 5 м. Самая большая величина оседания (от 70 до 104 см) наблюдается в центре депрессионной воронки, охватывающей территорию вокруг станций водоснабжения Хадинь, Фапван, Тьонгмай, Бачкхоа, в пределах которой имеются слабые грунты с мощностью больше 10 м. В зонах окраин и наружной части депрессионной воронки оседание поверхности существенно меньше (0–30 см), хотя в разрезе некоторых микрорайонов присутствуют слои слабых грунтов с мощностью больше 5 м. В зонах вдоль рек Красной и Дуонг оседание поверхности также невелико, лишь от 10 до 29 см. В зонах, сложенных с поверхности дочетвертичными отложениями, оседания поверхности в результате извлечения подземных вод не произойдет.

2. Величина оседания поверхности из-за добычи подземных вод на территории г. Ханоя с 2006 г. до настоящего времени составляет от 1 до 10 см, в среднем 4 см, что несколько меньше, чем в предыдущие годы.

3. В сравнении с 2013 г. показано, что к 2020 и 2030 гг. площадь зон оседания поверхности будет продолжать расширяться, но величина оседания поверхности будет увеличиваться немного, только от 1 до 15 см, в среднем 6 см. Скорость оседания значительно снизится. Величина оседания во многих разрезах будет достигать 60–80% от общего оседания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фи Х.Т., Строчкова Л.А. Прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханой (Вьетнам) // Изв. ТПУ. 2013. Т. 323. № 1. С. 161–167.

2. Фи Х.Т., Строчкова Л.А. Слабые грунты на территории города Ханой (Вьетнам) // Инженерная геология. 2014. № 1. С. 30–36.
3. Фи Х.Т., Строчкова Л.А., Минь Н.Н. Оценка и прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханой (Вьетнам) // Инженерная геология. 2012. № 2. С. 46–53.
4. Duong T.T. Hanoi land subsidence with reference to development of a proper monitoring network: master thesis in Engineering geology. Bangkok: Asian Institute of Technology, 2005. 124 p.
5. Giao P.H., Phien-wej N.A. FEM program for land subsidence analysis. Hanoi: VNU Publisher, 2004.
6. Giao P.H. Artificial Recharge of Bangkok Aquifer System for Mitigation of Land Subsidence. Doctoral Dissertation No. GE/96-2. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1997.
7. Groundwater Extraction Company. Report on prediction of groundwater level in Hanoi. No. 68 Bui Thi Xuan, Hai Ba Trung District. Hanoi, 2009.
8. HIBT. General Report on Soil Testing Results at 10 Monitoring Stations. 33D Cat Linh, Dong Da District. Hanoi, 2004. 125 p.
9. Nguyen N.M. Review and analysis Hanoi land subsidence monitoring data: master thesis in Engineering geology. Bangkok, 2008. 142 p.
10. Poland J.F. Guidebook to Studies of Subsidence Due to Groundwater Withdrawal. Prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8.4, United States of America. Michigan: Book Crafters, Chelsea, 1984.
11. Terzaghi K. Simplified Soil Test for Sub-grade and Their Physical Significance // Public Roads. 1925. V. 7. P. 153–162.

REFERENCES

1. Phi H.T., Strokov L.A. Prognostication of land subsidence due to groundwater exploitation in Hanoi (Vietnam) // *Izvestiya TPU*. 2013, no. 1, vol. 323, pp. 161–167 (in Russian).
2. Phi H.T., Strokov L.A. Soft soils of the Hanoi territory (Vietnam) // *Inzhenernaya geologiya*. 2014, no. 1, pp. 30–36 (in Russian).
3. Phi H.T., Strokov L.A., Min' N.N. Assessment and prognostication of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi (Vietnam) // *Inzhenernaya geologiya*. 2012, no. 2, pp. 46–53 (in Russian).

4. Duong, T.T. Hanoi land subsidence with reference to development of a proper monitoring network: master thesis in Engineering geology. Bangkok, 2005. 124 p.
5. Giao P.H., Phien-wej N.A. FEM program for land subsidence analysis. Hanoi: VNU Publisher, 2004.
6. Giao P.H. Artificial Recharge of Bangkok Aquifer System for Mitigation of Land Subsidence. Doctoral Dissertation No. GE/96-2. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1997.
7. Groundwater Extraction Company. Report on prediction of groundwater level in Hanoi. No. 68 Bui Thi Xuan, Hai Ba Trung District. Hanoi, 2009.
8. HIBT. General Report on Soil Testing Results at 10 Monitoring Stations. 33D Cat Linh, Dong Da District. Hanoi, 2004. 125 p.
9. Nguyen N.M. Review and analysis Hanoi land subsidence monitoring data: master thesis in Engineering geology. Bangkok, 2008. 142 p.
10. Poland J. F. Guidebook to Studies of Subsidence Due to Groundwater Withdrawal. Prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8.4, United States of America. Michigan: Book Crafters, Chelsea, 1984.
11. Terzaghi K. Simplified Soil Test for Sub-grade and Their Physical Significance // Public Roads. 1925. V. 7. P. 153–162.

PREDICTION MAPS OF LAND SUBSIDENCE DUE TO GROUNDWATER EXTRACTION IN HANOI (VIETNAM)

H.T. Phi, L.A. Stroková

*National Research Tomsk Polytechnic University, pr. Lenina 30, Tomsk, 634050 Russia.
E-mail: sla@tpu.ru*

The article presents research results of progressive land subsidence caused by consolidation of compressible water-bearing strata as a result of groundwater pumping in Hanoi (Vietnam). The investigations included collecting and analyzing data on the geology, hydrology, soil properties and observed cases of subsidence from 10 monitoring stations.

The city of Hanoi is underlain by sediments consisting of organic and inorganic clay, silt, peat, sand, and gravel. Pumping of groundwater causes consolidation of compressible aquifer layers. To simulate the time-dependent surface settlement caused by groundwater extraction, the multifactorial correlation analysis method (MCA) and finite element method (FEM) were used. The calculated subsidence correlated satisfactorily with the data obtained from field observations. Modeling is completed for forecasting the development of land subsidence in 92 points by the finite element method. The prediction maps are compiled for the surface subsidence in the year of 2020 and 2030. The predicted results showed that in 2013, most of the area in the central part of Hanoi showed the highest values of land subsidence ranging from 30 to 104 cm. In this zone, a large groundwater depression cone has been formed in the Pleistocene complex. The bulk of the area in the zone is covered by the soft soil strata, with their thickness exceeding 5 m. The suburb areas and the outer part of the depression cone manifest less significant land subsidence, ranging from 0 to 30 cm, although weak water-saturated soils with the thickness exceeding 5 m occur there. The land subsidence is insignificant in the areas along Red River and Duong River, ranging only from 10 to 29 cm.

In comparison with 2013, the map shows that in 2020 and 2030 the area subject to surface subsidence will continue to expand; although the subsidence value will increase insignificantly, only within 1–15 cm, with an average of 6 cm. The land subsidence rate will be significantly reduced. Recommendations are proposed for zoning the potential extraction of groundwater in the city territory.

Keywords: *Hanoi, ground, land subsidence, settling, groundwater extraction, modelling.*