

МОДЕЛ НА ПИЕЗОМЕТРИЧНАТА ДЕПРЕСИЯ В НЕОГЕН-КВАТЕРНЕРНИЯ КОМПЛЕКС ПРИ ИЗГРАЖДАНЕ НА I-ВИ ДИАМЕТЪР НА МЕТРОПОЛИТЕНА В ЦЕНТРАЛНАТА ЧАСТ НА ГРАД СОФИЯ

Николай Т. Стоянов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", София 1700; nts@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Високите пиезометрични нива и водообилността на неоген-кватернерния водоносен комплекс създават сериозни затруднения при строителството на метروполитена в централната част на гр. София. Основният проблем е свързан с отводняването на строителните изкопи за дълбоко фундираните съоръжения (метростанции и вентилационни шахти), при което се реализират много големи локални понижения на водните нива за един относително по-дълъг период. Продължителното действие на водопонизителните кладенци води и до забележими регионални промени в структурата на филтрационното поле. За определяне на пространствените размери и форма на създадената регионална пиезометрична депресия в неоген-кватернерния водоносен комплекс е разработен математически тримерен (3D) хидрогеоложки модел.

A MODEL OF THE PIEZOMETRIC DEPRESSION IN THE NEOGEN-QUATERNARY COMPLEX RELATED TO THE CONSTRUCTION OF THE FIRST SUBWAY DIAMETER IN THE CENTRAL PART OF SOFIA

Nikolay T. Stoyanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia 1700; nts@mgu.bg

ABSTRACT. The high piezometric levels and the big groundwater storage capacity of the Neogen-Quaternary aquifer complex are causing serious difficulties during the subway construction in the central part of Sofia. The main problem is connected to the groundwater drawdown in the excavations for deep foundation constructions (subway stations and ventilation shafts). During this process, very big local decreases in the water table levels are observed for a relatively long period of time. The continuous operation of the water lowering sumps is leading to noticeable regional changes in the filtration field structure. A 3D numerical hydrogeological model is developed in order to estimate the spatial dimensions and the shape of the generated regional piezometric depression in the Neogen-Quaternary aquifer complex.

Въведение

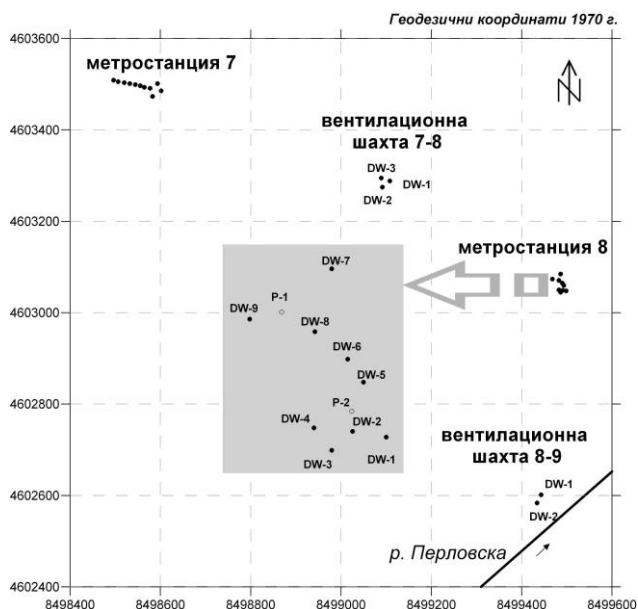
Сериозен проблем при изграждането на метрополитена в централната част на гр. София са високите пиезометрични нива и значителната водообилност на неоген-кватернерния водоносен комплекс. Отводняването на строителните изкопи за дълбоко фундираните съоръжения е свързано с развитие на много големи локални понижения на водните нива, които е необходимо да се поддържат за един сравнително по-дълъг период. Съвместното действие на системите от водопонизителни кладенци около изгражданите едновременно и/или в застъпващи се времеви интервали метростанции, вентилационни шахти и други части на метрополитена, води до твърде динамични регионални деформации в структурата на филтрационното поле. Създаването, често с големи амплитуди, изменения в разпределението на пиезометричните нива, респ. на хидравличните градиенти и скоростите на филтрация в подповърхностното пространство, могат да доведат до неравномерни слягания на земната основа или до възникване на суфозионни процеси. Същевременно, регионалната пиезометрична депресия във водоносния комплекс може да повлияе и на експлоатацията на близко

разположените вододобивни кладенци, както и на съседните отводнителни системи. Тези съпътстващи строителството на метрополитена негативни явления и процеси е необходимо да бъдат прогнозирани и по възможност контролирани и управлявани.

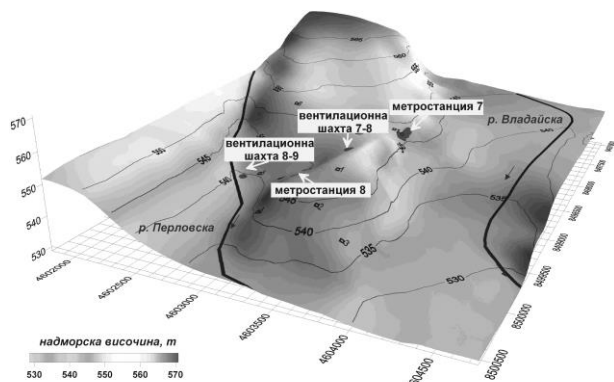
Успешното решаване на проблема е свързано с разработване на хидрогеоложки модели за оптимизиране на съвместната експлоатация на проектираните и/или вече изградени отводнителни системи. Един от най-добрите инструменти за създаване на подобни модели е компютърната програма Modflow. Нейният алгоритъм използва числени решения на основното диференциално уравнение на тримерната филтрация в порова среда. Математическият апарат и начинът за работа с програма Modflow са подробно описани в литературата (Andersen, 1993; McDonald, Harbaugh, 1988; Стоянов, 2003; и др.).

С разработения тримерен (3D) математически модел е направена прогноза за регионалната депресия в неоген-кватернерния комплекс при отводняване на строителните изкопи за основните съоръжения на I-ви метродиа метър в

централната част на гр. София (фиг. 1). Определен е оптималният режим на системата за отводняване на изкопа на Метростанция 8 (при СУ “Климент Охридски”) в условията на съвместна експлоатация на отводнителните системи на Метростанция 7 (при хотел “Шератон”), вентилационна шахта 7-8 (Кристал) и вентилационна шахта 8-9 (при стадион “Васил Левски”. Направена е и прогнозна оценка за въздействието на отводнителните системи върху нивата в близките вододобивни кладенци.



Фиг. 1. Местоположение на водопонизителните кладенци (DW)



Фиг. 2. Геоморфоложки особености и района на обекта

Математическият 3D модел е базиран на данни от конструктивните проекти и план-графиците на фирма “Тайсей” за изграждане на съоръженията от I-ви метродиаметър. Използвана е и обобщена информация от инженерно-геоложките и хидрогеоложките проучвания на трасето и строителните площадки, документацията за изграждането и експлоатацията на отводнителните системи и вододобивните кладенци в района (непубликувани фондови материали от архива на МОСВ и Столична община).

Концептуален модел

Основна хидрогеоложка единица е неоген-кватернерният водоносен комплекс. В по-общ план, комплексът се състои от два водоносни хоризонта: кватернерен и неогенски.

Кватернерният водоносен хоризонт заема горната част от разреза. Той има широки повърхностни разкрития между р. Перловска и р. Владайска (фиг. 3). Формиран е в алувиални и алувиално-пролувиални материали (чакъли, пясъци и глини). Средната му дебелина най-често варира в диапазона 5-20 m. Ниските стойности са характерни за терасата на р. Перловска. По-големите дебелини са установени в терасата на р. Владайска, която има широко разпространение в централните и северните части на района. Наслагите на р. Владайска са по-промити и много по-пропускливи от тези на р. Перловска. Поради това в кватернерния хоризонт се обособяват две хидрогеоложки от по-нисък ранг, респ. две зони с рязко различаваща се водопропускливост – зона 1 и зона 2. Границите на тези зони са показани на фиг. 3. Подземните води в кватернера са безнапорни, със свободни нива на около 3-5 m от терена. Те са в пряка хидравлична връзка с двете реки.

Неогенският водоносен хоризонт е формиран в седиментите на Лозенецката свита. Разрезът е представен от алтерниращи глини, пясъчливи глини и глинести пясъци с прослойки и лещи от пясъци и чакъли. Общата дебелина на тези седименти е около и над 100 m. Неогенският хоризонт има големи повърхностни разкрития във високите части на терена (фиг. 2-3). Той изгражда главния вододел между р. Перловска и р. Владайска. Подземните води в неогена са слабо напорни до напорни.

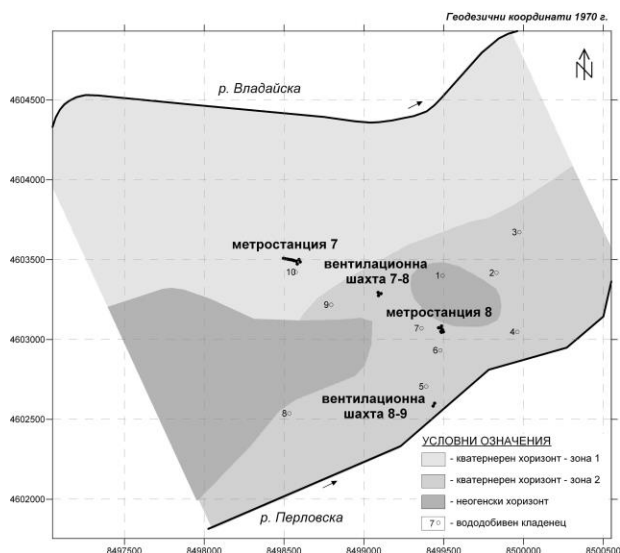
В табл. 1 са дадени приетите по данни от проведените в района филтрационни опити (Иванов 2008, и др.) изчислителни стойности филтрационните характеристики на отделените по-горе хидрогеоложки единици (коефициент на филтрация k и водоотдаване μ).

Структурата на филтрационния поток в неоген-кватернерния комплекс се контролира от двете реки. Определящо значение има ниското ниво в р. Владайска.

Генералната посока на потока е на СИ. Средният градиент е доста висок – около 0.01. Високите стойности (до 0.015) са характерни за ЮЗ по-издигната част на района, а ниските (около 0.006) – за СИ по-равнинна част.

Таблица 1. Характеристики на хидрогеоложките единици

Хидрогеоложка единица	Литолошко описание	Филтрационни характеристики	
		k , m/d	μ , -
Кватернерен хоризонт (зона 1)	чакъли и пясъци	15.0	0.1
Кватернерен хоризонт (зона 2)	пясъци и чакъли, заглинени	2.0	0.04
Неогенски хоризонт	глини, пясъчливи глини и пясъци	0.5	0.005



Фиг. 3. Хидрогеоложка карта

Подхранване на водоносния комплекс е от инфилтрация и от подземния поток, постъпващ по ЮЗ граница на разглеждания район. В някои участъци и при определени условия подземните води се подхранват и от двете реки. Скоростта на инфилтрация е изчислена при предположението, че 8% от годишната сума на валежите (693 mm) отива за подхранване на подземните води. Ще отбележим, че при направените сравнителни анализи за площно прецизиране на стойностите на инфилтрационното подхранване за различните терени (тревни и паркови площи, застроени терени, пътища, открити водоеми и т.н.), приемането на една осреднена за цялата моделна област величина е напълно оправдано и не води до снижаване точността на моделните решения и прогнози. Подземните води се дренират от двете реки и подземно по североизточната граница на разглежданата територия.

Според приетата работна хипотеза структурата на филтрационното поле в района се нарушава основно от действието на отводнителните системи на Метростанция 7 и вентилационни шахти 7-8 и 8-9. Хипотезата приема още, че подземните води при Метростанция 8 ще се дренират от девет кладенеца. Те трябва да понижат водното ниво в пункт Р-1 до кота 525.8, а в пункт Р-2 – до кота 524.5. Местоположението на всички кладенци е илюстрирано на фиг. 1 и фиг. 3. В табл. 2 са представени обобщени данни за тяхната конструкция, експлоатационни периоди и дебити до включване в действие на отводнителната система на Метростанция 8.

Основен филтрационен модел. Вариантни решения

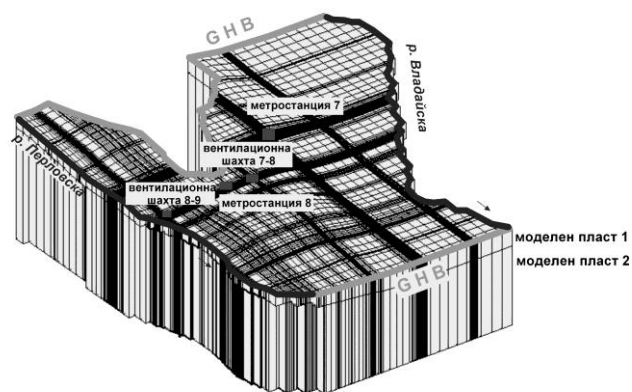
Съставеният основен филтрационен модел е тримерна математическа симулация на филтрационното поле, която отчита конкретната хидрогеоложка обстановка и всички външни въздействия. Основните положения и входни параметри при неговото композиране са следните:

- Моделът е съставен съобразно постановките, изложени в концептуалния модел и програма Modflow.
- Моделната област заема площ около 5.5 km². Моделът на ненарушеното филтрационно поле е основа на моделите на нарушеното от вододобивните и

водопонизителните кладенци поле. За съставянето му е използвана неравномерна ортогонална мрежа, която е съгласна в близост до кладенците, тъй като там градиентите са най-високи (фиг. 4).

Таблица 2. Данни за водопонизителните кладенци до включването на отводнителната система на Метростанция 8

Обект	Кладенец №	Дълбочина, m	Диаметър, m	Дебит, l/s	Експл. период, d
Метростанция 7	DW-1	16	160	3.0	90
	DW-2	16	160	3.0	
	DW-3	16	160	3.0	
	DW-4	16	160	3.0	
	DW-5	16	160	3.0	
	DW-6	16	160	3.0	
	DW-7	16	160	3.0	
	DW-8	16	160	3.0	
	DW-9	21	250	4.0	
	DW-10	21	250	4.0	
	DW-11	21	250	4.0	
Вентилационна шахта 7-8	DW-1	30	250	6.0	120
	DW-2	30	250	6.0	
	DW-3	30	250	6.0	
Вентилационна шахта 8-9	DW-1	34	315	10.0	365
	DW-2	34	315	10.0	
Метростанция 8	DW-1	25	125	0	-
	DW-2	25	125	0	
	DW-3	25	125	0	
	DW-4	25	125	0	
	DW-5	25	125	0	
	DW-6	25	125	0	
	DW-7	25	125	0	
	DW-8	25	125	0	
	DW-9	25	125	0	



Фиг. 4. Геометрия на моделните пластове. Гранични условия

- Математическият модел е двупластов. Горнището на първия моделен пласт е зададено като повърхнина, която точно симулира морфоложките особености на терена (вж. фиг. 2 и фиг. 4). Неговото долнище е представено със сложна повърхност, апроксимираща границата между терасните материали и неогенската подложка. Долнището на втория моделен пласт е зададено с хоризонтална равнина на кота 430 m.
- В първия моделен пласт са дефинирани 3 моделни зони, с които са симулирани двете зони с различна водопропускливост в кватернерния водоносен хоризонт и приповърхностната (разкрита) част на неогенския

водоносен хоризонт (фиг. 3). Всички моделни пластове и зони са зададени като тримерни обекти със съответните пространствени параметри и филтрационни характеристики (табл. 3).

- Двете реки са симулирани като тримерни обекти със съответните геометрия на руслото и хидравлични характеристики на речното течение. Зададени са с гранично условие от III род (River).
- Регионалният поток е моделиран с разход по ЮЗ и СИ граница. Използвано е гранично условие от III род по схемата GHB (фиг. 4). За началното разпределение на напорите във всяка моделна клетка и за напорите по границите са приети такива стойности, при които моделния филтрационен поток симулира максимално точно структурата на естествения подземен поток.
- Инфилтрационното подхранване от валежите е зададено като постоянна величина ($W = 1.5 \times 10^{-4}$ m/d) с гранично условие Recharge във всички моделни клетки по цялата площ на първия моделен пласт.
- Всички кладенци (вододобивни и водопонизителни) са зададени като тримерни обекти със съответните координати и конструктивни особености (диаметри, дълбочини и пр.).
- За калибриране на модела са използвани данните от направените пиезометрични и дебитометрични измервания при изграждането и експлоатацията отводнителните системи на Метростанция 7 и вентилационните шахти. Ползвана е информация за измерените нива в близките вододобивни кладенци.

Таблица 3. Характеристики на моделните пластове и зони

Моделен пласт	Моделна зона	Хидрогеоложка единица	Филтрационни характеристики	
			k, m/d	μ , -
МП-1	МЗ-1	Кватернерен хоризонт (зона 1)	15.0	0.1
	МЗ-2	Кватернерен хоризонт (зона 2)	2.0	0.04
	МЗ-3	Неогенски хоризонт	0.5	0.005
МП-2	-	Неогенски хоризонт	0.5	0.005

С така композирания основен филтрационен модел са разработени три вариантни решения.

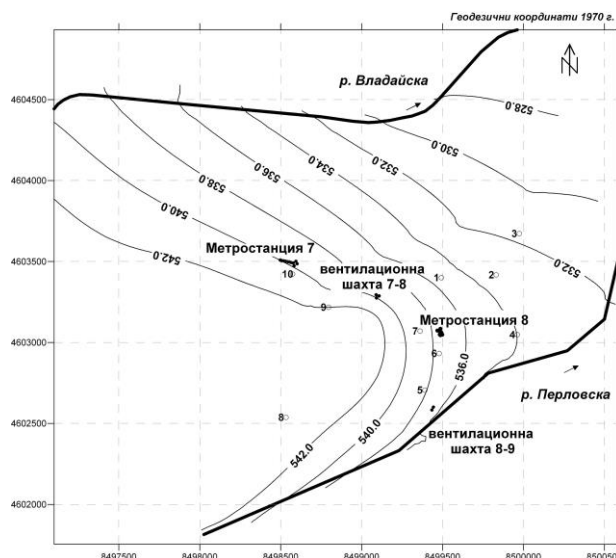
Вариант 1. Естествено филтрационно поле

В модела на ненарушеното (естествено) филтрационно поле е прието, че: водопонизителните кладенци на Метростанция 8 не са включени да работят; водопонизителните кладенци на Метростанция 7 и на вентилационни шахти 7-8 и 8-9 също не са в експлоатация; близките вододобивни кладенци не работят.

Получената при тези условия структура на подземния поток е илюстрирана на фиг. 5. Изчисленият с модела воден баланс (вж табл. 4) показва, че ресурсът на неоген-кватернерния комплекс в района е около 90 l/s. Над 87 % от този ресурс се формира от постъпващия по ЮЗ граница подземен поток, а останалата част идва основно от инфилтрация на валежни води. Около 50 % се оттича с подземния поток в СИ част на водоносния комплекс, извън границите на моделната област, а останалата част се дренира от двете реки.

Таблица 4. Воден баланс в естествени условия

Приходни елементи, Q_{in} , l/s		Разходни елементи, Q_{out} , l/s	
поток от ЮЗ част на неоген-кватернерния водоносен комплекс	79.59	поток към СИ части на неоген-кватернерния водоносен комплекс	43.81
р.Владайска	1.14	р.Владайска	33.20
р.Перловска	0.28	р.Перловска	14.40
инфилтрация на валежи	10.39		
Общо	91.40	Общо	91.41
Балансова грешка 0.01 % (difference)			

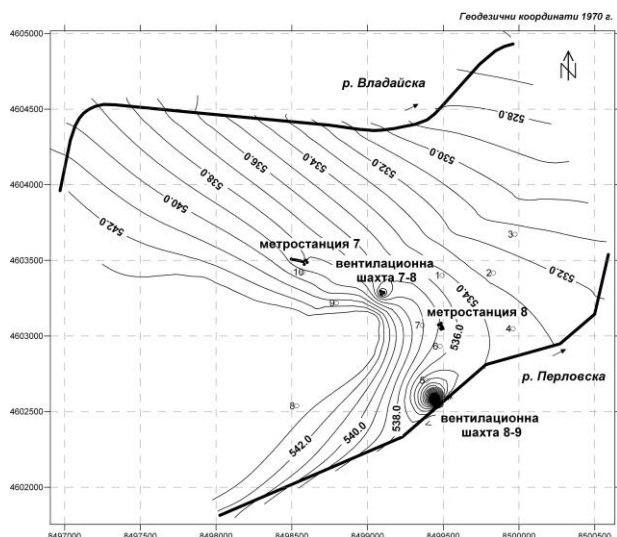


Фиг. 5. Структура на ненарушеното филтрационно поле

Вариант 2. Нарушено поле от отводнителните системи на Метростанция 7 и на вентилационни шахти 7-8 и 8-9

При този вариант симулацията е направена за период от една година. Прогнозният период е разделен на 12 равни стрес-периода, като всеки тях е с продължителност 30 d. Разглежда се хипотезата, че: водопонизителните кладенци на Метростанция 7 работят със сумарен постоянен дебит 36 l/s в продължение на 3 месеца (стрес периоди 10-12); водопонизителните кладенци на вентилационна шахта 7-8 работят със сумарен постоянен дебит 18 l/s в продължение на 4 месеца (стрес периоди 9-12); водопонизителните кладенци на вентилационна шахта 8-9 работят със сумарен постоянен дебит 20 l/s в продължение на 12 месеца (стрес периоди 1-12); водопонизителните кладенци на Метростанция 8 не са в експлоатация; близките вододобивни кладенци също не работят. Определената при тези условия нарушена структура на филтрационното поле е представена на фиг. 6.

Този вариант е разработен с оглед решаването на следните основни задачи: определяне на оптималния работен режим на отводнителната система на Метростанция 8 в условията на продължаваща експлоатация на отводнителните системи на Метростанция 7 и вентилационни шахти 7-8 и 8-9; детерминиране на регионалната пиезометрична депресия в неоген-кватернерния водоносен комплекс; количествена оценка на влиянието на отводнителните системи върху близките вододобивни кладенци.



Фиг. 6. Структура на ненарушеното филтрационното поле

Вариант 3. Нарушено поле при оптимален режим на работа на отводнителната система на Метростанция 8

Разглежда се подобна на използваната при Вариант 2 работна хипотеза. Различното в случая е, че: периодът за моделна симулация е две години, разделен на 24 равни стрес-периода (всеки по 30 d); в края на първата година започват работа кладенците около Метростанция 8 (стрес периоди 13-24); през втората година продължава и експлоатацията на отводнителните системи на Метростанция 7 и на вентиляционни шахти 7-8 и 8-9 (съответно стрес периоди 10-24, 9-24 и 1-24).

Оптималният режим на отводнителните кладенци на Метростанция 8 са определени след проиграване на голям брой вариантни решения с вариране на дебитите им в диапазона от 0.5 до 1.5 l/s. Целта на тази оптимизационна процедура е да детерминира работен режим, при който в границите на строителния изкоп ще се поддържа водно ниво до кота 525.8 в пункт Р-1 и до кота 524.5 в пункт Р-2. Получените оптимални дебити и понижения в кладенците на Метростанция 8 са дадени в табл. 5 и табл. 6.

В табл. 7 са представени допълнителните понижения близките вододобивни кладенци, които ще възникнат в резултат от съвместното действие на отводнителните системи на Метростанции 7 и 8 и вентиляционни шахти 7-8 и 8-9 (прогнозното време t се отчита след включването на отводнителната система на Метростанция 8). На фиг. 7 са представени моделните решения за нарушената от действието на отводнителните системи структура на филтрационното поле в два прогнозни момента, съответно 90 d и 365 d след включване на кладенците на Метростанция 8. За същите моменти са съставени и карти на изопониженията, даващи много добра представа за регионалната пиезометрична депресия в неоген-кватернерния водоносен комплекс (фиг. 8).

Заклучение

Базирайки се на резултатите от моделните решения могат да се направят следните по-важни прогнози и заключения. Хидравличните градиенти в близост до строителните изкопи, респ. под фундаментите на близките сгради, ще са най-високи в първите седмици след

Таблица 5. Оптимален експлоатационен режим на отводнителните кладенци (DW) на Метростанция 8

Вре- ме t , d	Дебит на отводнителните кладенци Q, l/s								
	DW 1	DW 2	DW 3	DW 4	DW 5	DW 6	DW 7	DW 8	DW 9
30	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
60	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
90	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
120	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
150	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
180	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
210	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
240	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
270	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
300	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
330	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
360	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

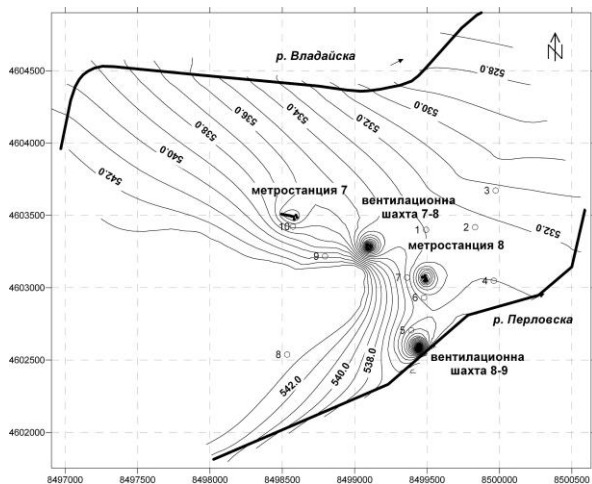
Таблица 6. Експлоатационни понижения в кладенците на Метро-станция 8 (Вариант 3)

№	Експлоатационни понижения s, m		
	$t = 90$ d	$t = 180$ d	$t = 365$ d
DW-1	11.48	11.93	12.35
DW-2	12.42	12.88	13.30
DW-3	11.96	12.42	12.84
DW-4	12.05	12.52	12.94
DW-5	12.45	12.81	13.24
DW-6	12.33	12.78	13.20
DW-7	10.84	11.29	11.71
DW-8	11.86	12.32	12.73
DW-9	10.56	11.01	11.41

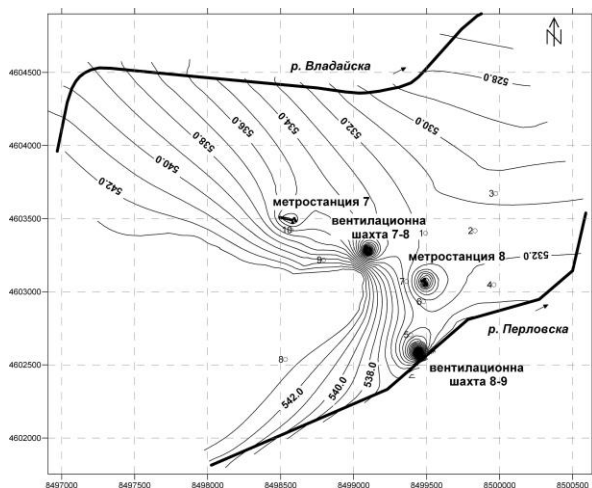
Таблица 7. Допълнителни понижения в близките вододобивни кладенци, създавани от отводнителните системи на Метростанции 7 и 8 и вентиляционни шахти 7-8 и 8-9

TK №	Собственик	Допълнителни понижения s, m		
		$t = 90$ d	$t = 180$ d	$t = 360$ d
1	Художеств. академия	2.2	3.0	3.4
2	ЦЗПБ	1.1	1.6	1.9
3	ОФ "Озеленяване"	0.2	0.5	0.9
4	II САГБАЛ "Шейново"	1.0	1.3	1.6
5	ОФ "Озеленяване"	5.9	6.2	6.4
6	ОФ "Озеленяване"	5.0	5.9	6.1
7	Хотел "Радисън"	5.1	6.0	6.2
8	I-ва градска болница	0.15	0.2	0.25
9	ОФ "Озеленяване"	1.2	1.5	1.8
10	Хотел "Шератон"	3.8	4.0	4.5

включване на съответната отводнителна система. Прогнозните стойности варират в диапазона 0.1-0.5, което създава сериозна опасност за неравномерни слягания на геоложката основа или за възникване на суфозия. Впоследствие пониженията нива под дъното на строителните изкопи ще останат постоянни, а нивата извън техните граници ще продължат да спадат. Хидравличните градиенти ще започнат да намаляват след последващото преразпределение на напорите във водоносния комплекс.



(а) Прогнозно време $t = 90$ d



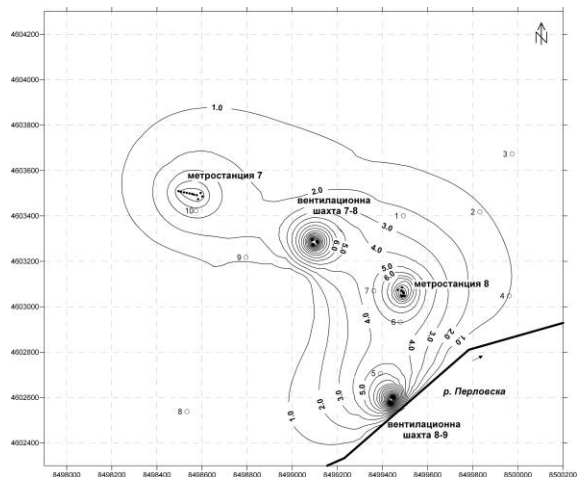
(б) Прогнозно време $t = 365$ d

Фиг. 7. Структура на филтрационното поле при съвместната експлоатация на отводнителните системи на Метростанции 7 и 8 и вентилационни шахти 7-8 и 8-9

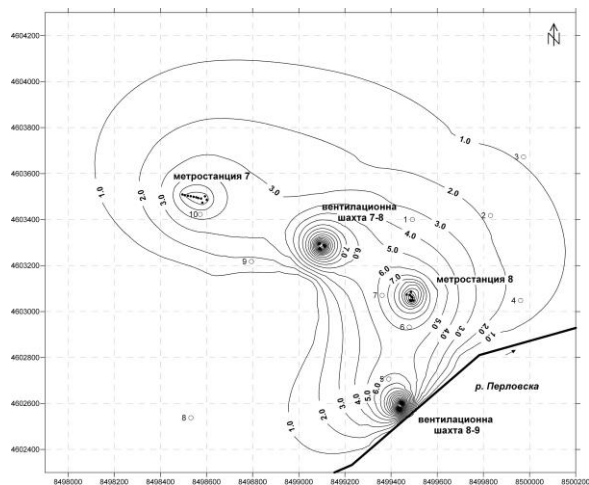
Постепенно регионалната пиезометрична депресия ще засегне значителни части от неоген-кватернерния водоносен комплекс, като в края на прогнозния период ще обхване зона с площ около 3 km². Все пак очакваните максимални понижения на водните нива (над 2 m) ще се заемат територия с площ под 1 km². В по-широк план понижението на подземните води ще засегне почти всички вододобивни кладенци в района (табл. 8). Допълнителните понижения зависят от отдалечеността им от отводнителните системи.

Литература

- Антонов, Х., Д. Данчев. 1980. *Подземните води в НРБ*. С., Техника, 206 с.
- Геоложка карта на България М1:100000. К. л. София. 1992. С., КГМР.
- Гълъбов, М., И. Йотов, В. Спасов, Д. Моллов, Н. Стоянов, В. Веселинов, С. Ковачев. 1995. *Хидрогеоложка оценка на вододобивните съоръжения и хидрогеолошко проектиране в района на София-град*. Договор №17/95, Акватер, София.



(а) Прогнозно време $t = 90$ d



(б) Прогнозно време $t = 365$ d

Фиг. 8. Регионална пиезометрична депресия в неоген-кватернерния водоносен комплекс (карти на изопониженията) при съвместната експлоатация на отводнителните системи на Метростанции 7 и 8 и вентилационни шахти 7-8 и 8-9

Иванов, И. и др. 2005-2008. *Проекти за водопонижителни системи на обектите Метростанция 7, Метростанция 8 и Вентилационни шахти 7-8 и 8-9*. Булгеоинвест (Фонд на Соф. метрополитен).

Проект за удължаване на Софийското метро. 2006. Тайсей корпорация, България (Фонд на Соф. метрополитен).

Стоянов, Н. 2003. *Оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от депа за твърди битови отпадъци*. Дисертация, С., МГУ "Св. Иван Рилски", 215 с.

Andersen P. F. 1993. A manual of instructional problems for the MODFLOW model. – In: *Center for Subsurface Modeling Support, EPA 600/R-93/010*.

Harbaugh, A.W., M. G. McDonald. 1996. Documentation for MODFLOW-96, an update to the USGS modular finite-difference ground-water flow model. – In: *USGS Open-File Report 96-486*.

Препоръчана за публикуване от
Катедра "Хидрогеология и инженерна геология", ГПФ