

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО НА ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ В РАЙОНА НА АГРОБИОХИМ, СТАРА ЗАГОРА ЧАСТ 1. МОДЕЛ НА ХИДРОДИНАМИЧНИТЕ УСЛОВИЯ ЗА ДВИЖЕНИЕ НА ЗАМЪРСИТЕЛИТЕ В КВАТЕРНЕР-НЕОГЕНСКИЯ ВОДОНОСЕН ХОРИЗОНТ

Николай Т. Стоянов, Чавдар П. Гюров

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

РЕЗЮМЕ. Изградената в последните 50 години индустриална зона на изток от гр.Стара Загора е един от най-големите замърсители на околната среда в регионален план. За прогнозиране на замърсяването на подземните води е съставен тримерен математически модел на условията за движение на замърсителите в основната хидрогеоложка единица в района – кватернер-неогенския водоносен хоризонт. При разработването на модела е използван детерминистичен подход за симулиране на филтрационната нееднородност на природния обект. Калибрирането на съставения модел е направено спрямо измерените напори в голям брой мониторингови пунктове. За минимизиране разликата между изчислените и измерените напори са варираны стойностите на коефициента на филтрация в моделните пластове (или в отделни техни части), на скоростта на инфилтрационно подхранване от валежите и на скоростта на инфилтрация на води под дъното на повърхностните водоеми. Посредством сравнителен анализ на получените вариантни решения е определен и основният хидродинамичен модел на кватернер-неогенския водоносен хоризонт, който най-точно симулира реалните хидрогеоложки условия.

MATHEMATICAL MODELS FOR PROGNOSTICATING GROUNDWATER POLLUTION IN THE REGION OF AGROBIOCHIM, STARA ZAGORA. PART 1. MODEL OF THE HYDRODYNAMIC CONDITIONS FOR MIGRATION OF POLLUTANTS IN THE NEOGENE-QUATERNARY AQUIFER COMPLEX

Nikolay T. Stoyanov, Chavdar P. Gyurov

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

ABSTRACT. The industrial zone, developed in the last 50 years to the east of Stara Zagora, is, in a regional plan, one of the biggest sources of pollutants to the environment. A 3-D mathematical model is developed for prognosticating groundwater pollution in this area. It reproduces the groundwater flux structure under the specific conditions of the main hydrogeological unit in the region – the Neogene-Quaternary aquifer complex. The model is based on the deterministic approach in order to simulate the filtration heterogeneity of the natural feature with a maximum reliability. The calibration of the developed model is performed in respect to the measured hydraulic heads in a big number of observation points. Different values for the hydraulic conductivity of the model layers (or of specific zones of these layers), for the rate of precipitation recharge, and for the infiltration rate of waters from the bottom of surface reservoirs are tried in order to minimize the discrepancy between calculated and measured hydraulic heads. The basic flow model of the Neogene-Quaternary aquifer complex is determined after a comparative analysis of the obtained solution variants. The selected model simulates in the most precise way the real hydrogeological conditions.

Въведение

Изградената в последните 50 години индустриална зона на изток от гр. Стара Загора в регионален план представлява един много голям замърсител на всички елементи на околната среда, в т.ч. и на основната хидрогеоложка единица в района – кватернер-неогенския водоносен хоризонт. Резултатите от проведените специализирани проучвания и мониторинговите наблюдения дават основание да се приеме, че основният източник на замърсяване на подземните води е сгруппираното езеро (СПЕ), в което се натрупва пепелината от ТЕЦ "Стара Загора" и се заустват производствените води от канализационната мрежа на промишлената зона. Тези води съдържат много широк спектър от конвенционални и токсични замърсители – съединения на азота, сулфати, фосфати, хлориди, капролактама, нефтопродукти, тежки метали и др. Немалка част от тях се инфилтрират под дъното на СПЕ и

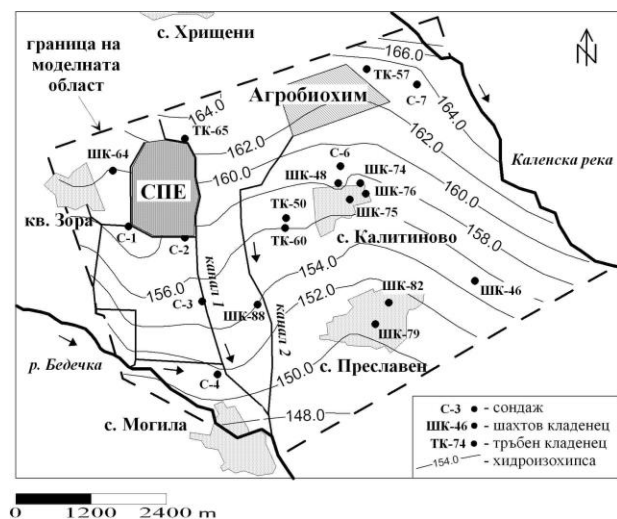
необлицованите канали, като водят до значителни промени в състава и качествата на плитко залягащите подземни води. Посредством числено моделиране на условията за разпространение на замърсителите в подповърхностното пространство е изготвена една по-прецизна прогноза за развитието на процесите на замърсяване, обхващащи кватернер-неогенския водоносен хоризонт. Моделирането включва разработването на един основен хидродинамичен модел и два миграционни модела. Хидродинамичният модел представлява тримерна математическа симулация на структурата на подземния поток, която детерминира пространственото разпределение на хидравличните градиенти, скоростите и водните количества в границите на моделната област. Той е използван като основа при съставянето на двата миграционни модела, с които се прогнозира поведението на несорбируемите и силно сорбируемите замърсители.

Първата част на статията е посветена на въпросите свързани с композирането и калибрирането на

хидродинамичния модел, като са представени основните моменти съдържащи се в концептуалния модел и важните резултати от направения воден баланс. Във втората част са разгледани двата миграционни модела и получените с тях прогнозни решения.

Концептуален модел

Изследваният район е разположен на изток от гр. Стара Загора на площ около 35 km². Той заема територията между кв. Зора от запад и Коленска река от изток. Северната граница се маркира от пътя Стара Загора-Бургас, а на южната – от линията минаваща през с. Могила и с. Преславен (фиг. 1).



валежи; инфильтрация на води от дъното на СПЕ. По експертна оценка, при съществуващите климатични условия, около 5-10 % от падналите валежи се инфилтрират в дълбочина. Като се има предвид, че средната годишна сума на валежите при станция Стара Загора е 628 mm, може да се приеме, че скоростта на инфильтрация W е в границите $0.86 \times 10^{-4} \div 1.72 \times 10^{-4}$ m/d. Скоростта на инфильтрация под дъното на СПЕ W_p е определена по метода, предложен в (Стоянов, 2003). При средна дебелина на слабопроницаемия утаечен слой 4 m, коефициент на филтрация на утайките 0.001 m/d, височина на водния стълб в езерото 0.5 m и височина на капиллярното покачване в горния водоносен пласт 2.5 m, за W_p се получава стойността 0.0175 m/d.

Основното дренiranje на водоносния хоризонт се реализира подземно в югоизточна посока, извън границите на района – към главната дренажна артерия р.Сюютлийка. Друга по-малка част от водите се дренират от дренажния канал около СПЕ, както и от другите два канала (1 и 2) и от двете реки. Трета част от подземните води напуска водоносната структура в резултат на работата на кладенците в с. Калиново (със сумарен дебит около 10 l/s) и на изградените на около 2 km на изток от с.Православен шахтов кладенец ШК-46 (с дебит 38.4 l/s).

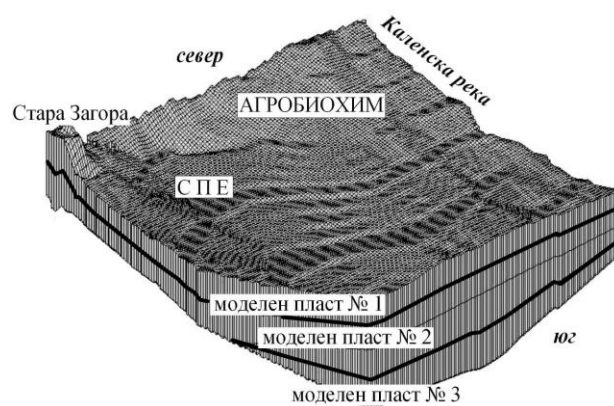
Главният източник на замърсяване на подземните води в района е СПЕ. Езерните води съдържат в много високи концентрации съединения на азота (амоний, нитрити, нитрати), сулфати, хлориди, капролактam, фосфати, нефтепродукти, тежки метали и др. В резултат на различни физико-химични процеси, постъпилите в СПЕ води се пречистват частично, след което се оттичат на юг от езерото по открит, необлицован канал – канал 1. Този канал се зауства в канала, идващ от площадката на Агробιοхим – канал 2, който е също открит и необлицован. Идващите по канал 2 отпадъчни води са по-слабо замърсени от тези в канал 1. На късо разстояние след точката на вливане двата канала се вливат в р. Бедечка (Фиг. 1). Силно замърсените езерни и канални води се инфилтрират в подповърхностното пространство. Те съдържат “коктейл” от конвенционални и токсични замърсители, всеки от които притежава различна миграционна способност. Основен механизъм за тяхното разпространение в кватернер-неогенския хоризонт е конвективният пренос, като определено значение имат и процесите на сорбция, молекулярна дифузия, механична дисперсия и смесване. При това несorбируемите и слабосорбируемите замърсители (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , фенол и др.) не взаимодействат с филтрационната среда и се движат със скорост равна на действителната скорост на подземния поток, а сорбируемите замърсители (NH_4^+ , HPO_4^- , нефтепродукти, тежки метали и др.) се задържат от твърдата фаза и мигрират доста по-бавно.

Композирание на хидродинамичния модел

Хидродинамичният модел представлява тримерна симулация на структурата на подземния поток, при която са отчетени всички външни въздействия върху кватернер-неогенския водоносен хоризонт, включително и хидравлични условия за проникване на замърсителите под

дъното СПЕ и необлицованите канали. При неговото разработване са ползвани постановките, изложени в концептуалния модел и компютърната програма MODFLOW. Програмата е съвместна разработка и е стандартизирана от U.S. Geological Survey и Environmental Protection Agency, USA. Използваният математически апарат и особеностите при работата с програмата са подробно описани в специализираната литература (McDonald and Harbaugh, 1988; Andersen, 1993; Harbaugh et al., 2000 и др.).

За пресъздаване на сложните пространствени форми на хидрогеоложките единици при 3D дискретизацията на моделната област е използвана равномерна ортогонална мрежа с 133 реда, 166 колони и 3 моделни пласта (Фиг. 2). Размерите на моделните клетки са 50×50 m, а общата площ на модела е 36 km^2 . Всички клетки в моделната област и по нейните граници са дефинирани като активни.



Фиг. 2. Моделна мрежа. Граници на моделните пластове

Релефът и хипсометричните нива на ограничителните повърхнини (т.нар. долница и горница) на моделните пластове са съобразени с морфологичните особености на терена и пространствените форми на хидрогеоложките единици (фиг. 2). Земната повърхност е зададена като горница на първия моделен пласт. След това са зададени повърхнините на долницата на всеки от трите моделни пласта.

При композирането на модела на всеки от моделни пластове са присвоени средни стойности за коефициента на филтрация k , като е прието широко практикуваното в математическото моделиране съотношение $k_x = k_y = 10k_z$ (табл. 1). Ще припомним, че зададените за k стойности са приблизителни, а действителните ще се получат при калибрирането на модела.

Таблица 1

Филтрационни характеристики на моделните пластове

Моделен пласт	Водоносен пласт	Коефициент на филтрация k , m/d		
		k_x	k_y	k_z
1	горен	0.50	0.50	0.05
2	долен	10.0	10.0	1.0
3	долен	10.0	10.0	1.0

Като начални напори в модела са зададени стойностите за напорите във всяка моделна клетка, изчислени чрез

интерполация на хидродинамичната карта към месец октомври 2004 година (Фиг. 1).

Количествените параметри на всички външни за моделната област въздействия, определящи размерите на приходните и разходните елементи на водния баланс, са зададени с въвеждане на следните гранични условия: граници със зададено ниво; разход по северната и югоизточната граница; инфильтрационно подхранване (от валежите и от СПЕ); граници със зададен дебит.

Двете реки и каналите са симулирани като граници със зададено ниво. В моделите те са включени като тримерни обекти. Зададените нива в клетките от първия моделен пласт, с които са симулирани повърхностните течения, са получени чрез интерполация между измерените коти на водните стоежи. Проводимостта по границата с известен запас е зададена при предположението, че реките и каналите не са колматирани. В модела се приема, че k на техните русла е равен на k на контактуващия с тях моделен пласт (в случая пласт 1).

Регионалният поток е моделиран чрез симулиране на разход по северната и югоизточната граница. Въведено е гранично условие от III род, като е използвана схемата GHB (General Head Boundary). Във всички моделни пластове е прието, че напорът по границата (h_b) е равен на зададения начален напор. Проводимостта по границите (C_b) е изчислена съобразно дебелината и коефициента на филтрация на моделния пласт, в която попада съответната моделна клетка.

Инфильтрационното подхранване от валежите е зададено като постоянна величина ($W = 1.72 \times 10^{-4}$ m/d) във всички клетки от първия моделен пласт извън контурите на СПЕ. Инфилтрация на води под дъното СПЕ е симулирана като в клетките попадащи в границите на езерото е зададена скорост на инфилтрация $W_p = 0.0175$ m/d. Зададените стойности за W , W_p и k са приблизителни. Точните стойности се получават след калибрирането на модела.

Като граници със зададен дебит в модела са включени кладенците в с. Калиново със сумарен дебит 10 l/s и на кладенец ШК-46 с дебит 38.4 l/s.

В така композирания хидродинамичен модел са въведени 17 наблюдателни точки със зададени в тях коти на измерения по време на хидрогеоложката картировка хидравличен напор (вж. табл. 2).

За да се установи достоверността на композирания модел, в зададените наблюдателни пунктове се следи разликата Δ_{obs} между изчислените с модела и измерените (реалните) стойности на напора. При това за удобство предварително се задава допустимата грешка Δ_{er} между изчислените и измерените нива.

Ще поясним, че на представените по-долу хидродинамични карти във всеки наблюдателен пункт съотношението между изчислените разлики Δ_{obs} и зададената допустима грешка Δ_{er} се представя графично със стълбче с определена дължина и цвят. Дължината на стълбчето указва разликата между изчислените с модела и измерените (реалните)

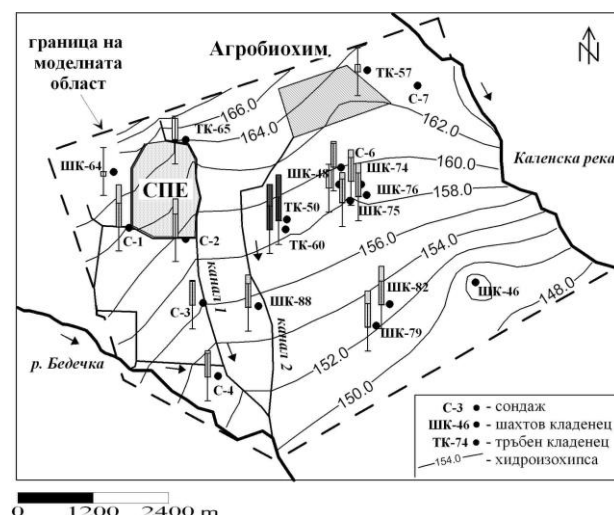
стойности на напора, а неговото положение (под или над наблюдателната точка) илюстрира положението на изчисления с модела напор, спрямо измерения. Белият цвят на стълбчето съответства на случая $\Delta_{obs} \leq \Delta_{er}$, сивият – $\Delta_{er} < \Delta_{obs} < 2\Delta_{er}$, а черният – $\Delta_{obs} > 2\Delta_{er}$.

Таблица 2

Коти на напора в наблюдателните точки

Кладенец №	Кота, m	Кладенец №	Кота, m
ШК-48	158.25	С-2	157.50
ШК-64	165.45	С-3	155.20
ШК-74	157.50	С-4	151.68
ШК-75	157.00	С-6	158.89
ШК-76	157.00	ТК-50	156.70
ШК-79	150.50	ТК-57	163.02
ШК-82	151.00	ТК-60	156.00
ШК-88	154.05	ТК-65	162.90
С-1	160.24		

На фигура 3 е представена получената с композирания първоначален хидродинамичен модел структура на подземния поток. Получените в повечето наблюдателни точки несъответствия между изчисления с този първоначален модел и измерените стойности на напора е свидетелство за не добро съответствие между моделираната и действителната пиезометрия.



Фиг. 3. Хидродинамичен (първоначален) модел

Калибриране на хидродинамичния модел

Калибрирането на модела има за цел да се постигне максималното му доближаване до реалната хидрогеоложка обстановка. Калибрационната процедура включва такава промяна на един или повече от използваните при композирането на модела входни параметри, която ще доведе до намаляване на различията между данни и моделното решение. За решаването на тези оптимизационни задачи са разработени и намират приложение голям брой компютърни програми – PEST, UCODE, MODINV и др. (Andersen, 1993). Основният модел на кватернер-неогенския хоризонт е калибриран с помощта

на програма PEST, която дава най-прецизните оптимизационни решения.

За минимизиране разликата между изчисленияте и измерените напори са варираны стойностите на коефициента на филтрация k в моделните пластове (или в отделни техни части), на скоростта на инфилтрационно подхранване от валежите W и на скоростта на инфилтрация на води под дъното на СПЕ W_p . По тази обща схема са проиграни голям брой варианти при комбинирането на различни схеми на задаване на начални стойности на k във втория моделен пласт с различни интерполационни методи. При всеки вариант началните стойности и границите на вариране за k в първия и в третия моделен пласт, както и тези за W и W_p се запазват едни и същи. Тези данни са представени в табл. 3.

Таблица 3

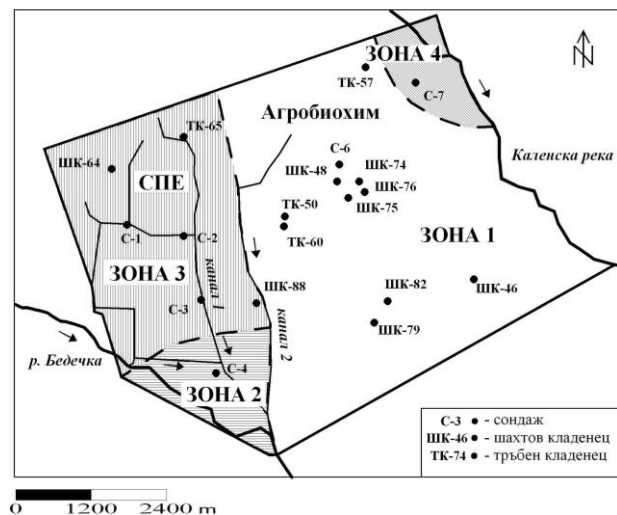
Начални стойности и граници на вариране на k в моделни пластове 1 и 3, на W и на W_p

Параметър	Начална стойност	Граници на вариране
k в моделен пласт 1, m/d	0.5	0.2-1.0
k в моделен пласт 3, m/d	10.0	1.0-25.0
W , m/d	0.00017	0.0001-0.00035
W_p , m/d	0.001	0.0005-0.01

Повечето от проиграните варианти дават близки, но не много точни резултати. Тук ще представяме трите най-добри вариантни решения. При тях са използвани следните комбинации между схемата на началните стойности на k в пласт 2 и използвания интерполационен метод.

Вариант 1

В моделен пласт 2 са отделени четири моделни зони, в които са зададени различни стойности за коефициента на филтрация k . Границите на тези зони са представени на фигура 4, а данните за началните стойности и границите на вариране във всяка зона са посочени в табл. 4.



Фиг. 4. Граници на зоните с различен коефициент на филтрация в моделен пласт 2, зададени при вариант 1

Таблица 4

Начални стойности и граници на вариране на k в зоните, детерминирани в моделен пласт 2

Зона	Коефициент на филтрация k , m/d	
	Начална стойност	Граници на вариране
1	21.0	15.0-30.0
2	7.8	5.0-15.0
3	4.5	2.0-10.0
4	0.9	0.5-10.0

Вариант 2

Коефициентът на филтрация във втория моделен пласт е зададен в специфицирани точки. Като такива са използвани 5 кладенеца, в които точно са определени стойностите на k (табл. 5). Интерполацията е направена по метода Kriging.

Таблица 5

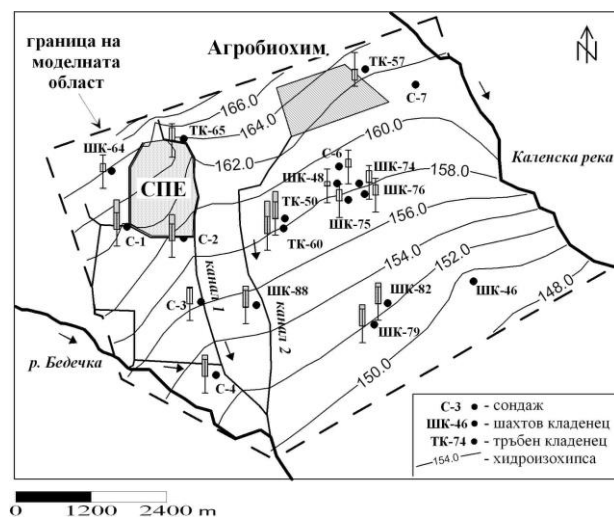
Стойности на k в специфицираните точки

Кладенец №	C-1	C-2	C-3	C-4	C-6
k , m/d	4.8	4.5	1.4	7.8	21.0

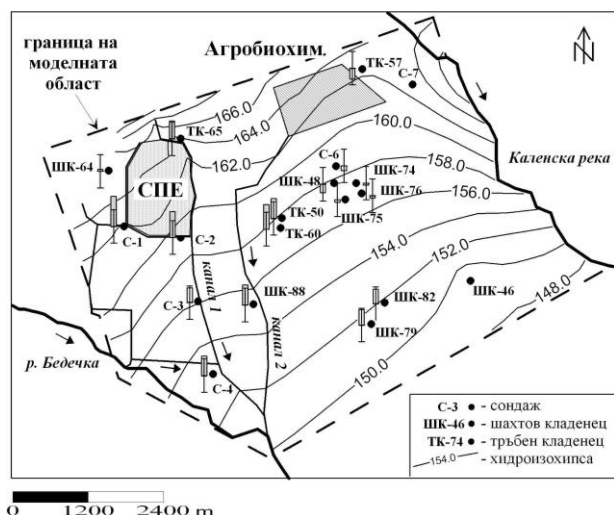
Вариант 3

При този вариант коефициентът на филтрация във втория моделен пласт е зададен по същия начин, както във вариант 2. Интерполацията в този случай е направена по метода Inverse Distance Weighted (IDW). Получените три вариантни решения за структурата на филтрационния поток са представени на фигури 5, 6 и 7.

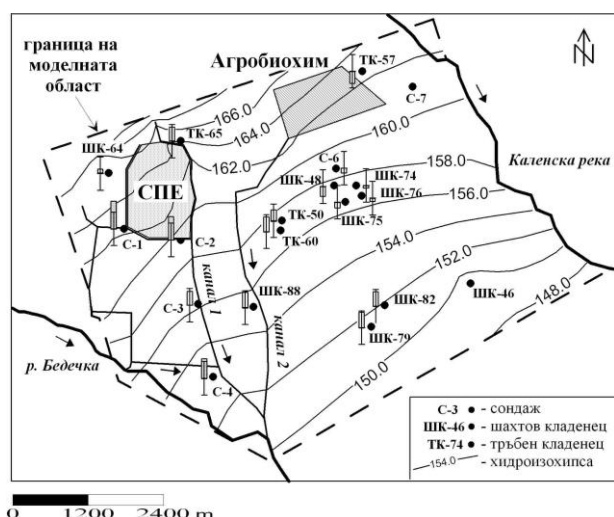
Сравнителният анализ показва, че калибрираният при условията на *Вариант 3* математически модел стои най-близко до реалните хидрогеоложки условия. При него само 3 от 17-те наблюдателни пункта не удовлетворяват условието $\Delta_{obs} \leq \Delta_{er}$. Полученото добро съответствие между фактичката и моделната пиезометрия във водоносната структура е свидетелство за устойчивостта и достатъчната надеждност на този модел. Това дава основания да го приемем за Основен модел на кватернер-неогенския водоносен хоризонт.



Фиг. 5. Калибриран модел при условията на вариант 1. Хидродинамична карта



Фиг. 6. Калибриран модел при условията на вариант 2.
Хидродинамична карта



Фиг. 7. Калибриран модел при условията на вариант 3.
Хидродинамична карта

Воден баланс

Посредством основния математически модел е направена количествена оценка на приходните и разходните елементи на водния баланс на кватернер-неогенския водоносен хоризонт. Резултатите от тази оценка са обобщени в табл. 6. Те позволяват да се направят следните по-важни изводи и заключения:

- Основното подхранване на подземните води е от реките и каналите (над 40%) и от водите, постъпващи по северната граница на моделната област (над 35%). Подхранването от инфилтрация на валежите е доста по-ограничено – около 15%.
- Под дъното на СФЕ постъпват ежедневно около 750 m³ води, които са с високи концентрации на азотни съединения, нефтопродукти, тежки метали и широк спектър от различни замърсители. Това потвърждава предположението, че СФЕ представлява много сериозен източник на замърсяване на подземните води.

- Подземният поток се дренира основно (над 55%) по югоизточната граница на модела, в посока към главната дренажна артерия в района – р. Сюютлийка.

Таблица 6
Воден баланс на кватернер-неогенския водоносен хоризонт

ПРИХОДНИ ЕЛЕМЕНТИ, Q^{in} , l/s		РАЗХОДНИ ЕЛЕМЕНТИ, Q^{out} , l/s	
Подхранване от инфилтрация на валежни води	40.5	Дебит на вододобивните кладенци	48.4
Подхранване от инфилтрация на води под дъното на СФЕ	8.7	Поток към дренажния канал около СФЕ	12.9
Подземен поток по северната граница (от скалния масив)	89.1	Подземен поток по югоизточната граница	137.7
Подхранване от реки и канали	103.0	Дрениране от реки и канали	46.0
Общо	241.3	Общо	245.0
Балансова грешка 1.51 % (difference)			

Ще припомним, че основният модел е калибриран спрямо водните нива, измерени през есента. Следователно съставеният воден баланс се отнася за периода на маловодие.

Разработеният основен хидродинамичен модел на кватернер-неогенския водоносен хоризонт точно детерминира пространственото разпределение на градиентите и скоростите на подземните води в района на Агробихим. Той е приет за основа при съставянето на миграционните модели.

Литература

- 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. Center for Subsurface Modeling Support, EPA 600/R-93/010.
- Harbaugh, A., E. R. Banta, M. C. Hill, M. G McDonald. 2000. MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular groundwater model – user guide to modularization concepts and the groundwater flow process. Open-File Report 00-92, USGS, Reston, VA, 130 p.
- McDonald, M. G., A. W. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference flow model. – In: *Techniques of Water Resources Investigations of the U.S.G.S., Book 6*. Ch. A1, 586 p.

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