

## ПРОГНОЗИРАНЕ НА ВЪЗМОЖНОТО ПОКАЧВАНЕ НА ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ В ЗАСЕГНАТИТЕ ОТ МИННАТА ДЕЙНОСТ КВАРТАЛИ НА ГРАД ПЕРНИК

*Николай Тонев Стоянов*

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

**РЕЗЮМЕ.** Съставени са един основен и два прогнозни локални 3D модела за оценка на съвременното състояние и възможните промени в структурата на подземния поток в засегнатите от минната дейност квартали на гр. Перник. Моделите са разработени с компютърна програма Modflow, при отчитане на резултатите от предходящи регионални моделни изследвания и на конкретните хидрогеоложки и минно-технологични условия. Основният локален 3D модел детерминира пространственото разпределение на пиезометричните напори (нивата на подземните води) и определя количествено приходните и разходните елементи на водния баланс след прекратяване на подземния въгледобив. С двата прогнозни модела са правени изчисления за очакваното покачване на подземните води и възможните промени във водния баланс след прекратяване на открития водоотлив и в условията на средни и максимални стойности на инфилтрационното подхранване.

### FORECASTING A POSSIBLE GROUNDWATER RISE IN THE AFFECTED BY THE COAL MINING AREAS IN THE CITY OF PERNIK

*Nikolay Tonev Stoyanov*

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

**ABSTRACT.** One basecase and two predictive local 3D models are developed in order to assess the current state and the possible future changes in the groundwater flow structure in the areas affected by the coal mining near the city of Pernik. The models are developed using the computer program Modflow and taking into account the results of prior regional modeling studies and the site specific hydrogeological and mining-technological conditions. The basecase local 3D model determines the spatial distribution of the piezometric hydraulic heads (groundwater levels) and estimates quantitatively the inflow and runoff elements of the water balance after termination of the underground coal mining. The two predictive models are used for performing calculations for the expected rise in groundwater and the possible changes in water balance after termination of the open draining and for the conditions of average and maximum values for the infiltration recharge.

### Въведение

За изясняване на съвременното състояние и възможните промени на нивата на подземните води след спиране на рудничния водоотлив в засегнатите от минната дейност части на гр. Перник са съставени локални хидрогеоложки 3D модели за района на кв. Байкушева махала, кв. Драгановец и кв. Рудничар. С получените моделни решения за всеки квартал е направена оценка на структурата на филтрационното поле след прекратяване на подземния въгледобив и прогноза за покачването на подземните води и промените във водния баланс след прекратяване на открития въгледобив и в условията на интензивна инфилтрация на атмосферни валежи.

Посредством компютърна програма Modflow (McDonald and Harbaugh 1988, и много други) са разработени един основен и два прогнозни хидрогеоложки 3D модела за територията на трите квартала и голяма част от нейния водосбор. Зададените в тях начални и гранични условия са базирани на разработения от автора „Регионален 3D модел на хидрогеоложките условия за района мини „Перник“ след спиране на подземния въгледобив“ (Стоянов 2014). Използвани са също непубликувани резултати от детайлни изследвания за изготвяне на геомеханична и

хидрогеоложка оценка на най-заstraшените обекти на повърхността от прекратените подземни минни дейности към „Мини Перник“ ЕАД (Митков и др., 2013), както непубликувани фондови материали от архива на МОСВ, „Мини Перник“ и община Перник.

### Основен хидрогеоложки 3D модел

**Концептуална схема.** Основният 3D модел използва следната обща концепция за хидрогеоложките условия на трите квартала и прилежащите им територии:

Изследваният район заема част от формираните в терциерните седименти водоносни комплекси, локализиращи в южната половина на водосбора на р. Дивотинска между р. Струма и откритите рудници (фиг. 1). Моделната област е на площ от 8,2 km<sup>2</sup>. В план контурите на основния модел естествено са очертани по повърхностните вододелни, р. Струма и границите на откритите рудници. В разрез са обхванати всички хидрогеоложки единици до дълбочина 100-150 m.

Разрезът включва следните хидрогеоложки единици:



Фиг. 1. Хидрогеоложка карта на изследвания район. Моделна област

- **Кватернерен водоносен комплекс  $Q_{Cmx}$ .** Формиран е в алувиалната тераса на р. Струма и се разполага по южната периферия на моделната област.
- **Палеогенски слабо водоносен комплекс (в естествено състояние)  $Pg_{Cmx}$ .** Развит е в тясна ивица (целик) между антропогенните комплекси и терасата на р. Струма (фиг. 1). Заляга повсеместно под отработените въглищни пластове. Тук палеогенските ненарушени седименти се характеризират с много слаба водопроницаемост, което предполага много слаб водообмен (или отсъствие на такъв) с отгорележащите водоносни комплекси.
- **Горен антропогенен комплекс  $Anthr_{Cmx-up}$ .** Формиран е в нарушените при открития добив части на въгленосния комплекс и изградените върху тях табани с „откривка“.
- **Среден антропогенен комплекс  $Anthr_{Cmx-m}$ .** Обединява отработени пространства на въглищни пластове D1 и D2 (подземни рудници, обрушени и напукани зони, целици).
- **Разделящ антропогенен комплекс  $Anthr_{Cmx-d}$ .** Изграден от мергели и мергелни глини от т.нар. „междупластие“ между въглищни пластове В и D1.
- **Долен антропогенен комплекс  $Anthr_{Cmx-l}$ .** Заема отработените пространства (подземни рудници, обрушени и напукани зони, целици) на по-дълбоко залягащите въглищни пластове А и В.

Площните разкрития на антропогенните комплекси са представени на фиг. 2, а техните сложни пространствени форми и взаимоотношения, които са имплементирани в основния локален 3D модел, са илюстрирани на фиг. 4.

Филтрационните параметри (коэффициент на филтрация  $k$  и водоотдаване  $\mu$ ) на дефинираните по-горе единици са определени по данни от проведено в района на трите квартала детайлно хидрогеолошко проучване (Митков и др. 2013). Дадените в табл. 1 стойности, които се припокриват със зададените в регионалния 3D модел, са използвани като начални стойности и за моделните пластове и зони в основния локален 3D модел.

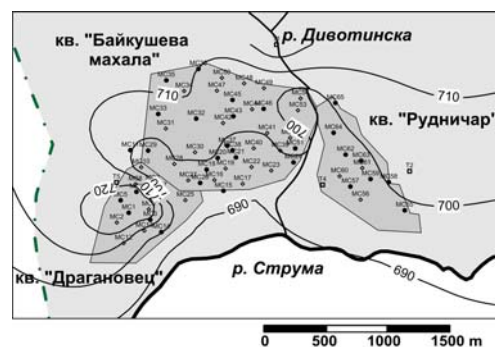
Пиезометрична карта по установените водни нива в мо-

ниторинговите сондажи и пунктове към април 2013 г. (фиг. 2) илюстрира структурата на филтрационното поле в района на кварталите Байкушева махала, Драгановец и Рудничар. Накратко, генералната посока е към р. Струма, като на този фон в различни участъци структурата на подземния поток е деформирана в резултат на частично дрениране на подземни води в р. Дивотинска или вследствие на високата проводимост в района на подземните минни изработки. Хидродинамичните връзки между водообилните антропогенни комплекси и тераса на р. Струма е опосредствено през вместващия ги ненарушен и много слабо проницаем палеогенски комплекс.

Таблица 1.

Характеристики на моделните пластове и зони

Хидрогеоложка единица				
Индекс	Моделен пласт	Моделна зона	$k, m/d$	$\mu$
Кватернерен водоносен комплекс				
$Q_{Cmx}$	ML-1	MZ-1.1	20.0	0.05
Палеогенски слабо водоносен комплекс				
$Pg_{Cmx}$	ML-1	MZ-1.3	0.03	0.005
	ML-2	MZ-2.1		
	ML-3	MZ-3.1		
	ML-4	MZ-4.1		
	ML-5	MZ-5.1		
Горен антропогенен комплекс				
$Anthr_{Cmx-up}$	ML-1	MZ-1.2	0.041	0.01
Среден антропогенен комплекс				
$Anthr_{Cmx-m}$	ML-1	MZ-1.4	0.24	0.03
	ML-2	MZ-2.2		
Разделящ антропогенен комплекс				
$Anthr_{Cmx-d}$	ML-3	MZ-3.2	0.034	0.005
Долен антропогенен комплекс				
$Anthr_{Cmx-l}$	ML-1	MZ-1.5	0.15	0.02
	ML-2	MZ-2.3		
	ML-3	MZ-3.3		
	ML-4	MZ-4.2		



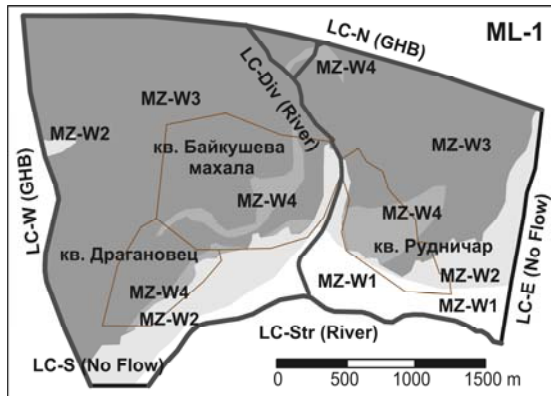
Фиг. 2. Пиезометрична карта към март 2013 г.

Границите на моделната област са следните:

- По горнището на модела (земната повърхност) граничните условия се дефинират с 4 зони с различно инфилтрационно подхранване и вътрешната за модела р. Дивотинска. Скоростта на инфилтрация ( $W$ ) за всяка зона е определена съобразно средногодишната сума на валежите за гр. Перник и литоложките характеристики на приповърхностния слой. Четирите зони са както следва: зона MZ-W1 - тераса на р. Струма ( $W_1 = 1.25E-4 m/d$ ); зона MZ-W2 - повърхностни разкрития на палеогенския ненарушен комплекс ( $W_2 = 3,5E-5 m/d$ ); зона MZ-W3 -

засегнати от възгледобива площ (W<sub>3</sub> = 5E-5 m/d); зона MZ-W4 - разкриващи се на повърхността части от възглищни пластове (W<sub>4</sub> = 1.0E-4 m/d) – фиг. 3.

- По долнището на модела границата е непроницаема.
- Латерални приповърхностни граници (в моделен пласт ML-1): север – граница със зададен поток (по приета от регионалния модел еквипотенциална линия); изток – непроницаема граница (по токова линия); юг – р. Струма; запад – граница със зададен поток (фиг. 3).
- Латералните дълбочинни граници (моделни пластове ML-2, ML-3, ML-4 и ML-5): север – граница със зададен поток (по приета от регионалния модел еквипотенциална линия); изток – непроницаема граница (по токова линия); юг и запад – граница със зададен поток.



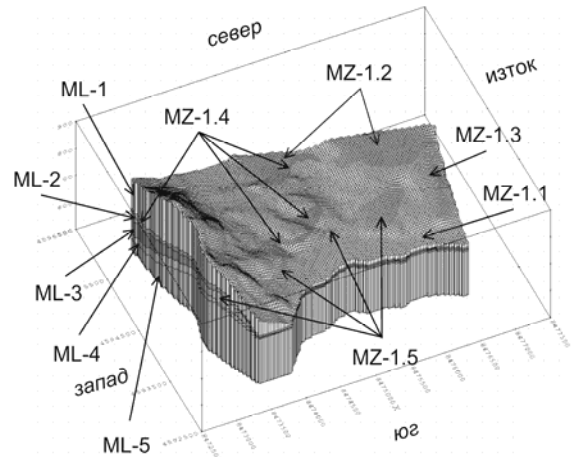
Фиг 3. Гранични условия в моделен пласт ML-1

**Композиране на основния локален 3D модел.** Основният 3D модел е композиран при следните изходни позиции и входни параметри:

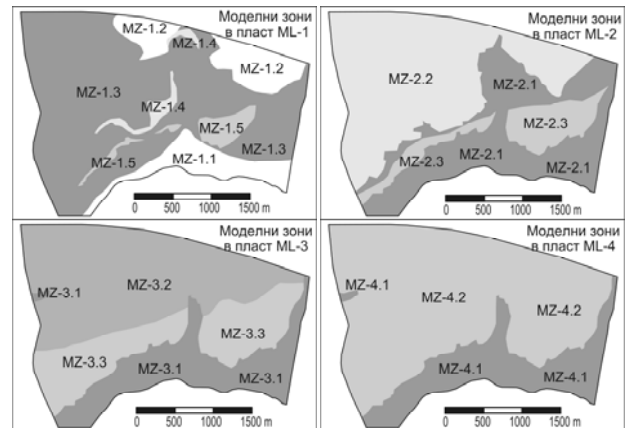
- Използвани са програма Modflow и постановките, изложени в концептуалната схема.
- Моделната област е дискретизирана с равномерна ортогонална мрежа. Моделът включва 5 моделни пласта и 14 моделни зони, чиито граници са илюстрирани на фиг. 4 и фиг. 5. Релефът на долнищата и горнищата на моделните пластове е съобразен с морфологията на терена и сложната геометрия на симулираните хидрогеоложки единици (фиг. 5).
- Зададените в модела стойности на филтрационните характеристики (k и  $\mu$ ) са представени в табл. 1.
- Регионалният поток е моделиран като по част от латералните граници е зададено гранично условие GHB.
- Реките Струма и Дивотинска са симулирани като тримерни обекти в пласт ML-1 с гранично условие от III род (River), съответно LC-Str и LC-Div – вж. фиг. 3.
- Инфилтрационното подхранване е зададено в моделен пласт ML-1 с гранично условие подхранване (Recharge). Границите на четирите зони с различна възможност за инфилтрация и зададените в тях начални стойности за скоростта на инфилтрация са илюстрирани на фиг. 3.

**Калибриране на основния локален 3D модел.** Калибрацията е направена с програма PEST (Andersen, 1993). Използвани са стойности на измерените през април 2013 г. напори в 33 сондажа и 4 повърхностни водни пункта (Митков и др. 2013). За минимизиране разликата между измерените и изчислените с модела напори са варирани стойности на инфилтрационното подхранване W и на

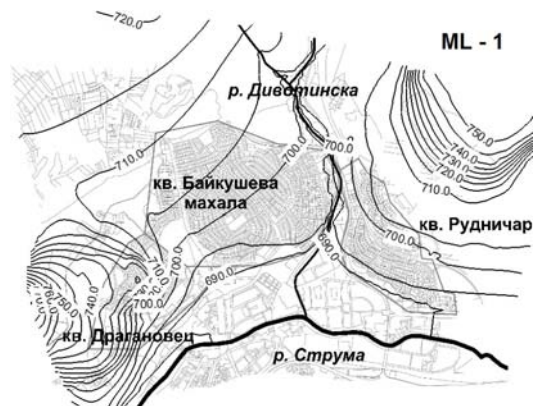
коэффициента на филтрация k. Използвана е схема, при която варираните параметри се задават в специфицирани точки, а интерполационната процедура е по метода Kriging. Полученото добро съответствие между фактичестката и моделната пиезометрия е свидетелство за устойчивостта и достатъчната надеждност на основния модел. Същият е приет за основа при разработване на прогнозните модели.



Фиг 4. Пространствена 3D дискретизация на моделната област

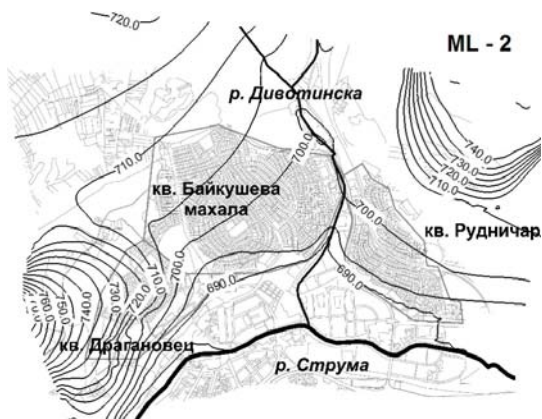


Фиг 5. Моделни зони в пластове ML-1, ML-2, ML-3 и ML-4



Фиг 6. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-1

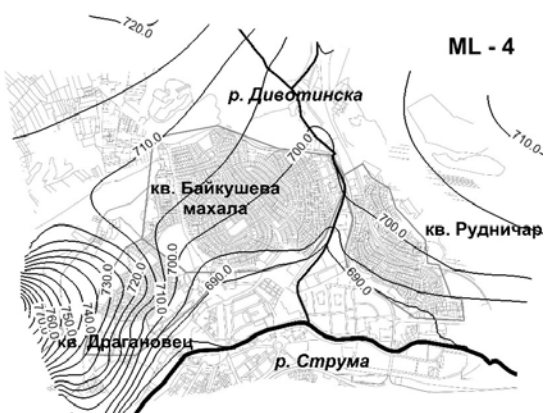
**Моделни решения.** Структурата на филтрационното поле, илюстрирана със съставените посредством основния ло-



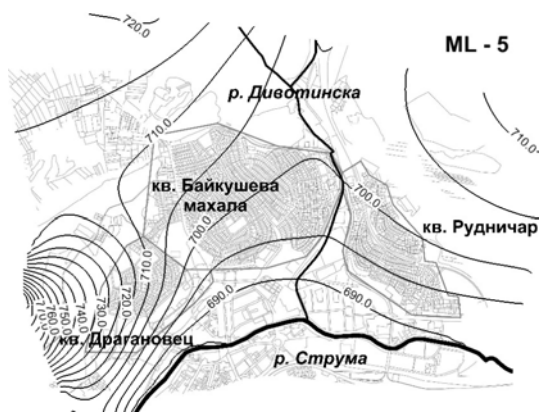
Фиг. 7. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-2



Фиг. 8. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-3



Фиг. 9. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-4



Фиг. 10. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-5

кален модел карти на разпределението на водните нива в петте моделни пласта (фиг. 6, 7, 8, 9 и 10), показва че:

- Главната посока на подземния поток е към р. Струма.
- Структурата на филтрационното поле, особено в моделен пласт ML-1, в резултат на активния водообмен е забележимо деформирана около р. Дивотинска.
- Хидравличните градиенти в склоновите участъци в ЮЗ и СИ част на района са много големи. Тук са формирани водоносни зони, между които хидравличните връзки са слаби (или отсъстват), а водните нива в тях са установени на различни хипсометрични нива.

Таблица 2.

Основен локален 3D модел. Воден баланс.

Приходни елементи (источници на подхранване), $Q_i^{in}$ , l/s		Разходни елементи (зони на дрениране), $Q_i^{out}$ , l/s	
Латерални граници	21,28	Латерални граници	19,08
Река Струма	8,79	Река Струма	9,22
Река Дивотинска	1,18	Река Дивотинска	2,17
Инфилтрация	11,05	Стари руднични галерии, дерета, разсеяни извори	11,79
Общо	42,30	Общо	42,26
Балансова грешка 0,1 % (difference)			

- В по-водопроникливите части на района (в зоната на подземните рудници и терасата на р. Струма) и в дълбочина (пластове ML-4 и ML-5) пиезометричните линии са плавни, а градиентите са доста по-ниски.
- Част от подземните води се оттича на повърхността от стари руднични галерии, от разсеяни извори с незначителен дебит или към деретата. Друга част се дренира подземно в терасата на р. Струма или извън границите на моделната област.

Водният баланс за района (табл. 2) дава основание да се направят следните по-важни изводи и обобщения:

- Общото количество на циркулиращите в моделната област с площ 8,2 km<sup>2</sup> подземни води е около 42 l/s.
- Основното подхранване (над 50 %) е от постъпващия по латералните граници подземен поток. Подхранването от инфилтрация е около 26 %. Постъпващите от р. Струма количества са около 21 % от приходната част на баланса, а от р. Дивотинска идват едва 3 %.
- Подземните води се дренират на юг през латералните дълбочинни граници (45 %) и в р. Струма (около 22 %). Друга значителна част (около 28 %) се дренира в стари руднични галерии, дерета и разсеяни извори. Останалите 5 % се оттичат към р. Дивотинска.

## Първи прогнозен модел

**Концептуална схема.** Първият прогнозен модел има за цел да оцени възможно покачване на подземните води и промени във водния баланс при следното развитие на минната дейност:

- Въгледобивът в откритите рудници се прекратява, а заедно с това спира и изпомпването на вода от рудничните котловани.

- Водните нива в рудниците започват да се покачват в резултат на подземен водоприток, атмосферни валежи и повърхностни скатови води. Същевременно, нивата на водите в палеогенския комплекс и в свързаните с него хидрогеоложки единици също се покачват до ново равновесно състояние, съответстващо на променената хидрогеоложка обстановка.
- Направените с регионалния модел предварителни изчисления, в които е променено единствено вътрешното гранично условие (водоотлива от откритите рудници), показват, че при тази нова ситуация следва да очакваме, че напорите по границите на основния локален 3D модел ще се повишат с не повече от 4-5 m в условията на стабилизирана филтрация.

**Композиране на първия прогнозен модел.** Първият прогнозен модел е изцяло базиран на основния локален 3D модел. Направените промени засягат само външните гранични условия по северната и западната граница на моделната област. В съответствие с концептуалната схема и с известен инженерен запас при дефиниране на граничното условие ГНВ по двете граници са зададени напори с 5 m по-високи от приетите в основния модел.

**Прогнозни резултати.** Получените прогнозни решения са дадени в обобщен вид на фиг. 11 и 12 и табл. 3. Представените резултати показват:

- Покачването на подземните води ще варира в твърде широки граници – от 0,1 до 4-5 m.
- Ниските стойности са характерни за участъци в близост до р. Дивотинска и терасата на р. Струма, където покачването ще е най-често от 0,1 до 1-2 m. Най-ниските стойности се отнасят за терасата на р. Струма. Слабото повишаване на водните нива в тези части се дължи на сравнително по-високата водопропускливост на филтрационната среда и непосредствената близост на зоните на естествено дрениране на подземния поток.
- В района на трите квартала покачването на водните нива ще е от 0,3 до 3-4 m. Най-голямо ще е в кв. Драгановец, а най-ниско – в кв. Рудничар.

Таблица 3.

*Първи прогнозен модел. Воден баланс.*

Приходни елементи (източници на подхранване), $Q_i^{in}$ , l/s		Разходни елементи (зони на дрениране), $Q_i^{out}$ , l/s	
Латерални граници	23,42	Латерални граници	19,05
Река Струма	8,57	Река Струма	9,65
Река Дивотинска	1,14	Река Дивотинска	3,17
Инфилтрация	11,05	стари руднични галерии, дерета, разсеяни извори	12,32
Общо	44,18	Общо	44,19
<i>Балансова грешка 0,03 % (difference)</i>			

- Независимо от повсеместно покачване на подземните води във високите части на терена, тяхната дълбочина ще е доста голяма – около 15-20 m и повече. В петите на склоновете участъци, понижените релефни форми, сухите дерета, долината на р. Дивотинска и терасата на р. Струма, обаче, водните нива се очаква да се установят по-близо до земната повърхност (най-често в

диапазона от 1 до 5 m). Възможно е също да възникнат някои, макар и много слаби и съвсем ограничени по площ водопроявления, главно покрай р. Дивотинска, преди навлизането ѝ в Струмската тераса.

- Не се очакват сериозни промени във водния баланс, както по отношение на количеството на водообмена, така и в съотношението на балансовите елементи.
- Разходът на циркулиращите в моделната област подземни води ще нарасне с 2 l/s. Допълнителният водоприток ще постъпва през северната и западната граница. Дренирането на подземния поток ще се увеличи в посока на р. Дивотинска с около 1.0 l/s, а към р. Струма с около 0.4 l/s. Дренираните водни количества в старите галерии и деретата също ще нарасне с 0.5 l/s.



Фиг. 11. Втори прогнозен модел. Дълбочина на подземните води след спиране на открития въгледобив.



Фиг. 12. Втори прогнозен модел. Покачване на подземните води след спиране на открития въгледобив.

## Втори прогнозен модел

**Концептуална схема.** Вторият прогнозен модел симулира по-екстремна хипотеза, с което се цели в дългосрочен план да се прогнозира максималното покачване на подземните води в района на трите квартала. Концептуалната схема включва:

- Приема се изцяло симулираната с първия прогнозен модел работна хипотеза, която допуска, че след спиране на водоотлива от откритите рудници нивото на подземните води по северната и западна граница на модела в един по-дълъг период ще се покачат с не повече от 4-5 m.
- В условията на по-продължителен дъждовен период се очаква, че инфилтрационното подхранване ще достигне своя максимум. Предварително проиграните с основния модел варианти показват, че максималните стойности на

скоростта на инфилтрация  $W$  за всяка от отделените четирите зони с различна водопрпускливост са:  $W_1 = 1.75E-4$  m/d;  $W_2 = 5.0E-5$  m/d;  $W_3 = 1.0E-4$  m/d и  $W_4 = 1.5E-4$  m/d (9 % от средния валеж).

- Направените с регионалния модел изчисления показват, че при по-интензивно инфилтрационно подхранване напорите по границите на основния локален модел ще се повишат с около 0,5 m при равни други условия.

**Композиране на първия прогнозен модел.** Вторият прогнозен модел е също изцяло базиран на основния модел. Промените засягат външните гранични условия по северната и западна граница на модела и инфилтрационното подхранване. При дефиниране на гранично условие GNB по двете граници са зададени напори с 5,5 m по-високи от приетите в основния модел. Това превишение отчита спирането на откритите рудници и интензивното инфилтрационно подхранване извън границите на основния модел. Инфилтрационното подхранване в четирите зони в моделен пласт ML-1 е зададено, съобразно приетите в концептуалната схема максимални стойности за скоростта на инфилтрация.

**Прогнозни резултати.** Резултатите от прогнозните изчисления са дадени в обобщен вид на фиг. 13, фиг. 14 и табл. 4. Представените карти на промените на водните нива и съставения воден баланс показват, че:

- Покачването на подземните води в района на трите квартала и прилежащите им територии ще варира в твърде широк диапазон – от 0,1 до 6,8 m.
- Най-ниските стойности (10-15 cm) се установяват в терасата на р. Струма.
- В района на кварталите покачването е доста по-високо – най-често от 3-4 до 5,5 m. Единствено в южната половина на кв. Рудничар е по-ниско – от 0,1 до 3, m. Ниските стойности се отнасят за терасата на р. Струма.
- Дълбочината на подземните води във високите части на разглеждания район ще остане голяма (10-15 m и повече), макар че покачването вследствие на продължителните валежи тук е най-голямо (от 3 до 6-7 m). Същевременно, в ниската част се очакват малки покачвания на водните нива (от 0 до 1 m), което предполага и слабо разширяване на зоните с плитко залягащи подземни води. Главно покрай р. Дивотинска, в петите на склоновете и дълбоките дерета подземните води ще са съвсем близо до повърхността, а водопроявленията и заблатяванията на терена е възможно да обхванат по-голяма територия.
- Подземният водообмен в границите на модела ще се увеличи с около 3 l/s.
- Подхранването на подземните води от инфилтрация ще е с 5,5 l/s по-голямо, т.е. с повече от 50 % над обичайните стойности. Същевременно, постъпващия през северната и западната граница на модела подземен поток ще се увеличи с 1,8 l/s. Речното подхранване се очаква да спадне поради значителното повишаване на напорите във всички водоносни комплекси (без алувиалната тераса).
- Дренажът на подземните води по посока на р. Дивотинска ще се увеличи с приблизително 1.2 l/s, към старите галерии и деретата с около 0,9 l/s, а към р. Струма също с 0,9 l/s.



Фиг. 13. Втори прогнозен модел. Дълбочина на подземните води след края на открития възгледобив и при продължителни дъждове.



Фиг. 14. Първи прогнозен модел. Покачване на подземните води след края на открития възгледобив и при продължителни дъждове.

Таблица 4.

Втори прогнозен модел. Воден баланс.

Приходни елементи (източници на подхранване), $Q_i^{in}$ , l/s		Разходни елементи (зони на дрениране), $Q_i^{out}$ , l/s	
Латерални граници	21.98	Латерални граници	20.37
Река Струма	7.92	Река Струма	10.14
Река Дивотинска	1.05	Река Дивотинска	3.34
Инфилтрация	15.56	стари руднични галерии, дерета, разсеяни извори	12.67
Общо	46.51	Общо	46.52
Балансова грешка 0.02 % (difference)			

## Литература

- Митков, В. (р-л проект). 2013. Изготвяне на геомеханична и хидрогеоложка оценки на най-застрашените обекти на повърхността от прекратените подземни минни дейности към „Мини Перник“ ЕАД (л). Докл. на ДЗЗД „Видекс-Геотехника, Фонд „Мини Перник“ ЕАД (л).
- Стоянов, Н. Т. 2014. Регионален 3D модел на хидрогеоложките условия в района на мини „Перник“ след прекратяване на подземния възгледобив. – Год. МГУ „Св. Ив. Рилски“, 57, 1, (под печат).
- Andersen, P. F. 1993. A manual of instructional problems for the MODFLOW model. Center for Subsurface Modeling Support, EPA 600/R-93/010.
- McDonald, J. M., A. W. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference flow model. - *Techniques of Water Resources Investigations of the USGS*, Book 6. 586.

Статията е рецензирана от проф. д-р Михаил Гълъбов и препоръчана за публикуване от кат. „Хидрогеология и инженерна геология“.