

РЕГИОНАЛЕН 3D МОДЕЛ НА ХИДРОГЕОЛОЖКИТЕ УСЛОВИЯ В РАЙОНА НА МИНИ „ПЕРНИК“ СЛЕД ПРЕКРАТЯВАНЕ НА ПОДЗЕМНИЯ ВЪГЛЕДОБИВ

Николай Тонев Стоянов

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

РЕЗЮМЕ. Посредством регионален математически тримерен (3D) модел са симулирани (представени) условията за формиране и движение на подземните води в района на мини „Перник“ след прекратяване на подземния въгледобив. При неговото разработване е използвана компютърната програма Modflow. Моделът отчита природните и техногенните фактори, довели до съвременното състояние и с доминиращо значение за динамиката на хидрогеоложките процеси в дългосрочен план. Акцентът на моделните изследвания е към по-обстоен анализ на силно променената и твърде усложнена от въгледобива среда, на фона на несложните естествени хидрогеоложки условия в Пернишката котловина. Получените резултати са сериозна основа за разработване на локални модели за оценка на количествените характеристики на водния баланс, структурата на подземния поток и динамиката на водните нива в засегнатите от минната дейност части на територията на гр. Перник.

REGIONAL 3D MODEL OF THE HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS IN THE PERNIK MINES AREA AFTER TERMINATION OF UNDERGROUND COAL MINING

Nikolay Tonev Stoyanov

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

ABSTRACT. The conditions for the formation and the movement of groundwater in the Pernik mines area after termination of underground coal mining are simulated by a regional mathematical three-dimensional (3D) model. It is development using the computer program Modflow. The model takes into account the natural and technogenic factors that led to the current state and that have dominant influence over the dynamics of the long term hydrogeological processes. The focus of the research is to perform a detailed analysis of the highly altered and complicated groundwater flow conditions as result of the coal mining environment as compared to the relatively simple natural hydrogeological conditions in the Pernik Valley. The obtained results are a solid basis for the development of local models aimed towards estimating the water balance quantitative characteristics, the groundwater flow structure, and the water levels dynamics in the affected by the coal mining areas in the city of Pernik.

Въведение

Въгледобивът в Пернишкия въглищен басейн води началото си от 1891 г. Добивните дейности са изпълнявани по открит и подземен способ на площ 260 km². В резултат на продължилия 120 г. въгледобив в района са настъпили значителни промени в геотехническите и хидрогеоложките условия. Най-големи са промените в участъците с подземен добив, заемащи площ 49 km². В обхвата на тази територия попада една значителна част от гр. Перник.

Многогодишният въгледобив е причина за значими изменения в състоянието и филтрационните свойства на подповърхностното пространство и до създаване на зони с висока проникваемост и голяма водообилност. Същевременно, след спиране на водоотливните системи в рудниците се наблюдава бързо покачване на нивата на подземните води и водопроявления в различни зони на повърхността. Това е довело до оводняване на приземни етажи на жилищни сгради и замочурявания на терена в три пернишки квартала – кв. Байкушева махала, кв. Драгановец и кв. Рудничар (фиг. 2 и фиг. 4).

Главна цел на съставения регионален математически 3D модел е да симулира условията за формиране и движение на подземните води в района гр. Перник, при отчитане на природните и техногенните фактори довели до съвременното състояние и с доминиращо значение за развитието на хидрогеоложките процеси в дългосрочен план. Акцентът на моделните изследвания е към по-обстоен анализ на силно променената и твърде усложнена от въгледобива среда, на фона на несложните естествени хидрогеоложки условия в Пернишката котловина.

С регионалния модел се търсят отговорите и на редица важни въпроси относно водния баланс, структурата на подземния поток и динамиката на водните нива в засегнатите от минната дейност квартали след прекратяване на рудничния водоотлив. Същевременно, получените резултати са добра основа за дефиниране на началните и граничните условия при съставянето на локални прогнозни 3D модели за всеки квартал.

Регионалният 3D модел е съставен посредством компютърна програма Modflow (McDonald and Harbaugh 1988; Harbaugh et. all. 2000, и много други). Приетите в модела концепция и входни данни са базирани на непуб-

ликувани 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). Използвана е и обобщена информация за геоложките, минно-техническите и хидрогеоложките условия (по непубликувани фондови материали от архива на МОСВ, „Мини Перник“ и община Перник).

Концептуална схема

При разработване на регионалния 3D модел се използва следната концепция за хидрогеоложките условия в района гр. Перник и прилежащите му територии:

Изследван район. Заема значителни части от Пернишката грабенова структура, локализирана между р. Струма и планинските оградни склонове на Витоша и Люлин (фиг. 1).



Фиг. 1. Граници на моделна област

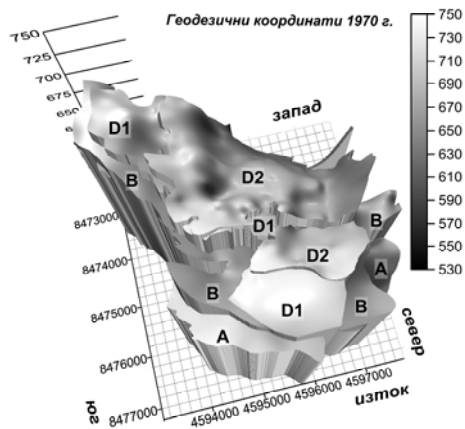


Фиг. 2. Хидрогеоложка карта на изследвания район. Моделна област

Моделна област

- Латерално обхваща площ от 101,8 km². Оградните планински масиви, повърхностните вододели и развитата речна мрежа са главни маркери, определящи естествените граници на модела (фиг. 1 и фиг. 2).
- Вертикално моделът включва хидрогеоложки единици, установени в горната част на терциерния разрез (до 100-

150 m). Изборът е мотивиран от два важни факта: (1) подземният въгледобив е развиван до дълбочина 60-70 m (рядко до 90 m), респ. в тези рамки са формирани и силнопроводящите и с голям капацитет техногенни зони; (2) под тази граница палеогенският седиментен комплекс е здрав, плътен и много слабо водопропусклив.



Фиг. 3. Тримерен модел на отработените при подземния добив части на въглищни пластове А, В, D1 и D2 (релеф на долинцата)

Хидрогеоложки единици. Основните хидрогеоложки единици в моделната област са:

- **Кватернерен водоносен комплекс** - Q_{cmx} . Обхваща незначителни площи в южната и западната периферия на модела. Представен е от деснобрежните алувиални тераси на р.Струма и р.Рударница и левобрежните тераси на р.Конска и р.Мещица.
- **Неогенски неводоносен комплекс** - N_{cmx} . Разкрива се като петна в издигнатите западни участъци на района. Разглежда се като съставна част от зоната на аерация.
- **Палеогенски слабодоносен комплекс (в естествено състояние)** - Pg_{cmx} . Изгражда около 95 % от моделната област, т.е. изпълнява ролята на матрица, в която са вместени останалите хидрогеоложки единици. Това обстоятелство наред с ниската проницаемост на палеогенските седименти е причина за частично капсулиране на водоносните комплекси и зони, както и за забавяния водообмен в регионален план.
- **Палеогенски водоносен комплекс (в нарушено състояние)** - ($Anthr_{cmx}$). Този комплекс е продукт на продължил над 100 г. открит и подземен въгледобив. На практика е най-водобилната структура, която създава и основните проблеми с подземните води. Характеризира се с изключително сложна геометрия, много силна хетерогенност и изразена анизотропия на средата, която и в момента търпи промени. Анализът на геоложката и минно-техническа информация за обхвата и хидравличната свързаност на отработените въглищни пластове (А, В, D1 и D2) и на засегнатите от механични деформации вместиращи скали дават основание в състава на нарушения палеогенски комплекс да се отделят четири антропогенни хидрогеоложки единици:
 - **Горен комплекс** ($Anthr_{cmx-up}$). Формиран е в нарушените при открития добив части от палеогенския въгленосен комплекс и изградените върху тях табани с „откривка“. Обхваща откритите рудници и разреза до дълбочина 5-10 m и повече.

- *Среден комплекс (Anthr_{cmx-m})*. Обединява естествено свързаните отработени пространства (подземни рудници, обрушени зони, напукани зони и целици) на въглищни пластове D1 и D2.
- *Разделящ комплекс (Anthr_{cmx-d})*. Обхваща частично нарушените мергели и мергелни глини от т.нар. „междупластие“ между въглищни пластове B и D1.
- *Долен комплекс (Anthr_{cmx-l})*. Включва отработените пространства (подземни рудници, обрушени зони, напукани зони и целици) на по-дълбоко залягащите, но близко разположени въглищни пластове A и B.

За улесняване и прецизиране на тримерната симулация в регионалния модел е съставен числен модел на долницата на отработените части на въглищни пластове A, B, D1 и D2 (фиг. 3).

Филтрационни свойства. Познатието за филтрационните характеристики на детерминирани в модела хидрогеоложки единици е обективно ограничено поради:

- Специфика на филтрационната среда. Подземните води се движат в (а) слабопропусклива до практически непроницаема, силно хетерогенна и анизотропна среда, изграждаща матрикса на моделираната хидрогеоложка система; (б) кухини с големи размери и нарушени високопроводящи зони, различни направления и сложни пространствени връзки помежду им.
- Локален характер на проведените филтрационни тестове. Те са съсредоточени в засегнатите квартали, чиято територия съставлява не повече от 5-6% от площта на моделната област.
- Отсъствие на архивна информация за хидрогеоложките условия в регионален план. Този факт е напълно обясним предвид практическата неводоносност на седиментите, запълващи Пернишкия грабен.

Таблица 1.

Характеристики на моделните пластове и зони

Хидрогеоложка единица				
Индекс	Моделен пласт	Моделна зона	k, m/d	μ , -
Кватернерен водоносен комплекс				
Q _{cmx}	ML-1	MZ-1.1	20.0	0.05
Неогенски неводоносен комплекс				
N _{cmx}	ML-1	MZ-1.2	0.05	0.01
Палеогенски слабоводоносен комплекс				
P _{gcmx}	ML-1	MZ-1.3	0.03	0.005
	ML-2	MZ-2.1	0.03	0.005
	ML-3	MZ-3.1	0.03	0.005
	ML-4	MZ-4.1	0.03	0.0005
	ML-5	MZ-5.1	0.01	0.0001
Горен антропогенен комплекс				
Anthr _{cmx-up}	ML-1	MZ-1.4	0.041	0.01
Среден антропогенен комплекс				
Anthr _{cmx-m}	ML-2	MZ-2.2	0.24	0.03
Разделящ антропогенен комплекс				
Anthr _{cmx-d}	ML-3	MZ-3.2	0.034	0.005
Долен антропогенен комплекс				
Anthr _{cmx-l}	ML-4	MZ-4.2	0.15	0.02

След внимателен анализ на наличните данни за литоложките и физичните характеристики на геоложката

среда и на резултатите от филтрационните опити (Митков и др. 2013), за коефициента на филтрация (k) и водоотдаването (μ) на детерминирани хидрогеоложки единици са приети средните стойности, посочени в табл. 1. Те са ползвани като начални при характеризиранието на моделните пластове и зони в регионалния 3D модел.

Разпределение на хидравличните напори. Генералната посока на подземния поток е от оградните планински масиви (Витоша и Люлин) към р.Струма и нейните притоци. Структурата на регионалния поток се деформира в района на антропогенните комплекси, които изпълняват ролята на голяма дренажна система спрямо Палеогенския ненарушен комплекс. Тази теза се потвърждава от пиезометричната карта, съставена по данни от измерените към месец април 2013г. нива на подземните води и водните стоежи в реките и повърхностните водоеми (фиг. 4).

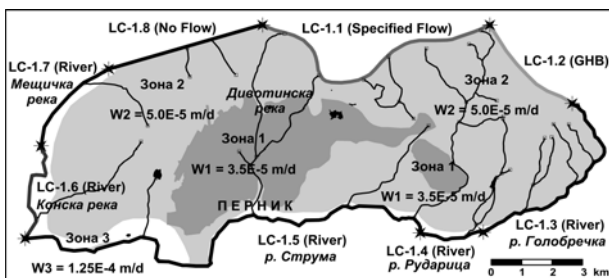


Фиг. 4. Пиезометрична карта към март 2013 г.

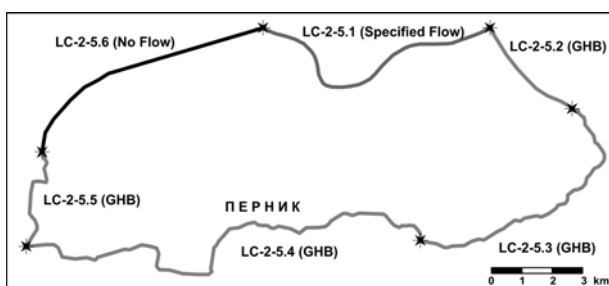
Граници на моделна област. Моделната област е дефинирана като относително самостоятелна хидрогеоложка система с много отчетливи и хидравлично детерминирани пространствени граници:

- *Отгоре.* На терена (по горницето на модела) се очертават три зони с различно инфилтрационно подхранване и няколко вътрешни за моделната област реки и водоеми и (фиг. 5). В модела се задават с гранични условия Recharge (площна инфилтрация), с River (гранично условие от III род) или Specified Head (гранично условие от I род). Зоните с различна инфилтрация са очертани въз основа на литоложки и зърнометрични особености на разкриващите се на терена хидрогеоложки комплекси. Стойностите на скоростта на инфилтрация (W) за всяка зона са изчислени като функция на средногодишната сума на валежите за станция Перник и на литоложките характеристики. Детерминирани по този начин зони са: *Зона 1.* Включва разкрития на Палеогенския ненарушен слабоводоносен комплекс и Неогенския неводоносен комплекс. Скоростта на инфилтрация е ниска – $W_1 = 3.5E-5$ m/d, което представлява около 2% от валежа. *Зона 2.* Обхваща засегнатите от открития и подземния въгледобив площи, а W е малко по-висока – $W_2 = 5E-5$ m/d (около 3% от валежа). *Зона 3.* Попада в границите на алувиалните речни тераси, скоростта на инфилтрация е доста висока – $W_3 = 1.25E-4$ m/d, т.е. инфилтрационното подхранване е 7.5% от валежите.
- *Отдолу* (по долницето на модела) границата е непроницаема, респ. граница с нулев разход ($q = 0$).
- *Латерални граници* според физическата им същност са няколко типа: реки, подземен поток от/към съседни

водоносни комплекси, регионален поток или непроницаеми граници. В зависимост от своето пространствено разположение латералните граници биват приповърхностни (видими и лесно определими) и дълбочинни (предполагаеми). Приповърхностните граници се задават в първия моделен пласт, а дълбочинните в отдолулежащите моделни пластове. По-конкретно, дефинираната моделна област е оконтурена със следните приповърхностни латерални граници (вж. фиг. 5): север – граница със зададен поток (Specified Flow) от Горнокредния слабоводоносен комплекс; североизток – граница със зададен регионален поток (GHB) по вододела между реките Бученишка и Люлинска; изток-югоизток – р. Голобръчка; юг – р. Струма и р. Рударика; запад – р. Конска и р. Мещичка; северозапад – непроницаема граница (по токова линия). По-дълбоко залягащите части на моделната област са оконтурени със следните латерални (дълбочинни) граници (фиг. 6): север – граница със зададен поток (Specified Flow) от Горнокредния слабоводоносен комплекс; североизток – граница със зададен регионален поток (GHB) по вододела между реките Бученишка и Люлинска; изток-югоизток – граница със зададен поток (GHB) от Горнокредния слабоводоносен комплекс; юг-запад – граница със зададен регионален поток (GHB), симулираща дренажния се извън границите на моделната област подземен поток; северозапад – непроницаема граница (по токова линия).



Фиг. 5. Гранични условия в моделен пласт ML-1



Фиг. 6. Гранични условия в моделни пластове ML-2, ML-3, ML-4 и ML-5

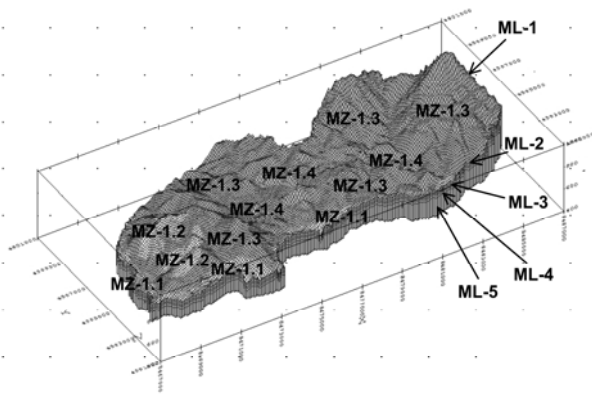
Хидравлични връзки. Основно допускане е, че взаимодействието между по-водообилните алувиални тераси и антропогенни комплекси се реализира през вмествания ги ненарушен и много слабо проницаем палеогенски комплекс (матрикса на моделираната хидрогеоложка система). Нивото на подземните води във всеки комплекс ще се влияе главно от постъпилите в него водни количества (от инфилтрация или от ненарушения комплекс) и от дренажното му по естествен път или посредством водопонизителни съоръжения (гравитачно

или с помпи). Реакцията в другите водоносни комплекси ще е забавена или ще липсва.

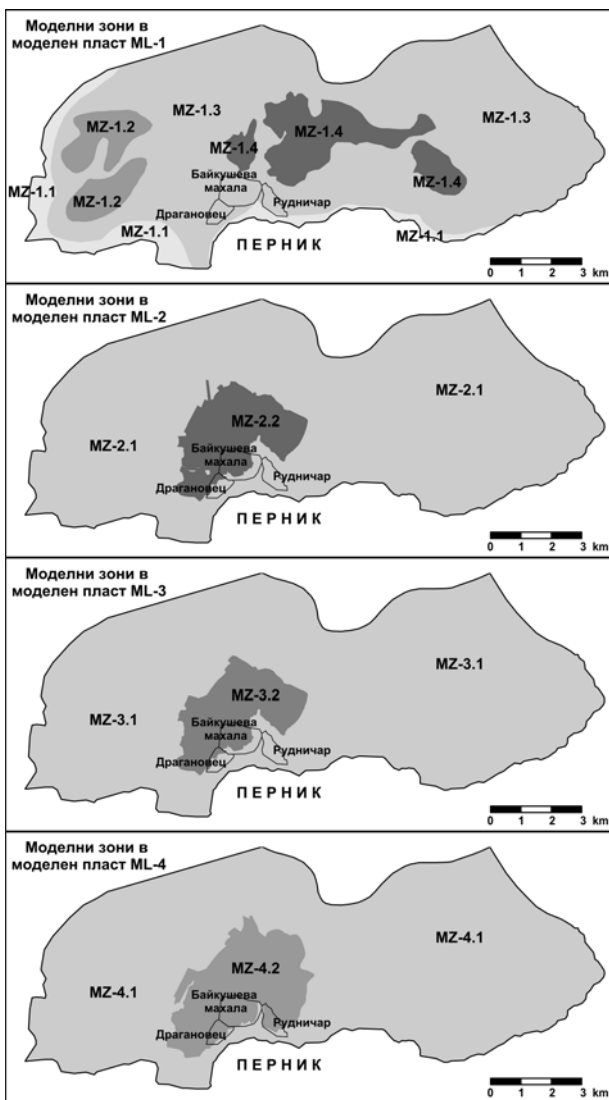
Композиране на регионалния 3D модел

Тримерната рамка на регионалния модел, е композирана при следните положения и входни параметри:

- Използвани са компютърната програма Modflow и постановките, изложени в концептуалната схема.
- Пространствената дискретизация на моделната област е направена посредством равномерна ортогонална мрежа, съдържаща 5 моделни пласта – ML-1, ML-2, ML-3, ML-4 и ML-5. В първите четири пласта са детерминирани 10 моделни зони. Границите на моделните пластове и зони са дадени на фиг. 7 и фиг. 8.
- Релефът и хипсометричните нива на ограничителните повърхнини (т.нар. долница и горница) на моделните пластове и зони са съобразени с морфологичните особености на терена и пространствените форми на хидрогеоложките единици (фиг.7). Земната повърхност е зададена като горница на ML-1 (фиг. 1 и фиг. 7).
- В моделните пластове и зони филтрационните характеристики (k и μ) са зададени съобразно дадените в табл. 1 стойности. За коефициента на филтрация е прието съотношение $k_x = k_y = 10k_z$.
- Регионалният поток е моделиран със задаване на гранично условие GHB по част от външните граници. В граничните клетки е прието, че напорът е равен на зададения начален напор. Проводимостта по границата е изчислена съобразно дебелината на моделния пласт и коефициента на филтрация в пласта или зоната, в която попада съответната моделна клетка.
- Реките Струма, Конска, Рударика и другите по-малки реки в района са симулирани като тримерни обекти със съответната геометрия и хидравлични характеристики. Зададени са в моделен пласт ML-1 с гранично условие от III род (River) – фиг. 5.
- Повърхностните водоеми са зададени с гранично условие от I-ви род (Specified Head).
- Водните стоежи в реките и повърхностните водоеми са зададени въз основа на събраната архивна информация, допълнена и осъвременена с направеното детайлно хидрогеолошко проучване през април 2013г. (Митков и др. 2013). Приетите начални стойности са коригирани впоследствие при калибрирането на модела.
- Подхранването от горнокредния слабоводоносен комплекс е зададено по северната граница на моделната област с гранично условие от II род (Specified Flow) – фиг. 5. По границата е приет постоянен разход на подземния поток $q = 0,3$ (l/s)/km. Тази начална стойност също се коригира в хода на калибрационните процедури.
- Инфилтрационното подхранване е зададено във всички клетки на първия моделен пласт с гранично условие подхранване (Recharge). Приетите в модела граници на трите зони с различна възможност за инфилтрация и зададените в тях начални стойности за скоростта на инфилтрация са представени на фиг. 5.
- За калибриране на модела са използвани данни за нивата на подземните води, измерени по време на детайлното проучване през 2013 г., както и съставената пиезометрична карта (фиг. 4).



Фиг. 7. Пространствена 3D дискретизация на моделната област



Фиг. 8. Моделни зони в пластове ML-1, ML-2, ML-3 и ML-4

Моделни решения

Структура на филтрационното поле. Определената с регионалния 3D модел структура на филтрационното поле е илюстрирана с пиезометрични карти, представящи разпределението на хидравличните напори (водните нива) в петте моделни пласта (фиг. 9 - фиг. 13). Полученото

добро съответствие между фактическата и моделната пиезометрия е свидетелство за устойчивостта и достатъчната надеждност на модела.

Въз основа на получените моделни решения може да се направи следния коментар:

- Генералната посока на поток е от главните подхранващи провинции Люлин планина и Витоша към р. Струма.
- Пиезометричната картина, особено в приповърхностната част на многоетажния водоносен комплекс (моделен пласт ML-1) – фиг. 9, е силно усложнена в резултат на активния водообмен между подземните води от една страна и реките и повърхностните водоеми (основно откритите рудници) от друга.
- В обхвата на планинските склонове и хълмистите територии хидравличните градиенти са много високи и следват наклона на терена. На различни хипсометрични нива съществуват водоносни пластове и зони, които са несвързани или с много слаба хидравлична връзка по между си. Част от тях се дренират по склоновете, в ниските части на деретата или в речната мрежа под формата на разсеяни извори (рядко концентрирани) с незначителен дебит (около и под 0,01 l/s).
- В равнинните участъци и в дълбочина (особено в моделни пластове ML-4 и ML-5) пиезометричните линии са изгладени, без резки преходи и с относително пониски хидравлични градиенти – фиг. 12 и фиг. 13.
- Забележими деформации в структурата на филтрационното поле се наблюдават в района на подземните минни изработки, които се характеризират с един и повече порядъка по-висока проводимост от вместващата ги естествена геоложка среда и изпълняват функцията на регионален дренаж със сложна пространствена форма.

Регионален воден баланс. Съставеният с математическия 3D модел регионален (общ) воден баланс за цялата площ на моделната област е представен в табл. 2. Представените резултати от направената количествена оценка на балансовите елементи в условията на стабилизирания режим на филтрация дават основание да се направят следните по-важни обобщения и изводи:

- Сумарното количество подземни води, циркулиращи във водоносните комплекси в рамките на изследвания район на площ 102 km² и до дълбочина 150-200 m, са в размер на 280 l/s.
- Основното подхранване (над 67%) е от формирования в оградните планини горнокреден слабоводоносен комплекс (около 36 %) и от водещите началото си от Люлин и Витоша реки и повърхностни потоци (около 31%). Други 18 % постъпват чрез инфилтрация на падналите валежи. Около 10 % от подхранването е за сметка на привлечени води от повърхностните водоеми, а останалите 5 % постъпват от р. Струма.
- Дренирането на подземните води (около 70 % от общия регионален разход) се реализира в равни части към съседни на разглеждания район хидрогеоложки единици и в речно-овражната мрежа посредством разсеяни или относително концентрирани естествени изходища. Останалите 30 % от регионалния разход, също в относително равни части, изтича към р. Струма и в откритите водоеми (предимно в действащите открити рудници).



Фиг. 9. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-1 (приповърхностна зона – глини и напукани мергели)



Фиг. 10. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-2 (пласт D1, пласт D2 и обрешените над тях зони)



Фиг. 11. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-3 (междупластие между D1 и V)



Фиг. 12. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-4 (пласт А, пласт V и обрешените над тях зони)



Фиг. 13. Структура на филтрационното поле в моделен пласт ML-5 (незасегната от минната дейност част от палеогенския комплекс)

Локален воден баланс. С регионалния модел е съставен локален воден баланс за водосборната област на засегнатите от минната дейност квартали (табл. 3). Площта на

Таблица 2.

Регионален (общ) воден баланс в границите на модела

Приходни елементи (източници на подхранване), Q_{in}^i , l/s		Разходни елементи (зони на дрениране), Q_{out}^i , l/s	
Горнокреден слабоводоносен к-с	102,25	Съседни хидрогеоложки единици	98,21
Река Струма	14,39	Река Струма	43,94
Други реки, дерета	86,87	Други реки, дерета	96,72
Външни части на Палеогенския к-с	26,30	Външни части на Палеогенския к-с	41,34
Открити водоеми	50,44	Открити водоеми	
Инфилтрация	280,25		280,21
Общо	102,25	Общо	98,21
Балансова грешка 0,02 % (difference)			

Таблица 3.

Локален воден баланс във водосбора на кварталите

Приходни елементи (източници на подхранване), Q_{in}^i , l/s		Разходни елементи (зони на дрениране), Q_{out}^i , l/s	
Горнокреден слабоводоносен к-с	6,95	Съседни хидрогеоложки единици	10,29
Река Струма	1,48	Река Струма	7,81
Други реки, дерета	8,60	Други реки, дерета	12,23
Външни части на Палеогенския к-с	10,56	Външни части на Палеогенския к-с	9,97
Открити водоеми	10,58	Открити водоеми	10,50
Инфилтрация	13,76		
Общо	51,93	Общо	51,80
Балансова грешка 0,25 % (difference)			

този водосбор, съвпадащ отчасти с водосбора на р. Дивотинска, е 29 km² (фиг. 4). Анализът на представените резултати показва, че:

- Подземният водообмен във водосборната област на трите квартала до дълбочина 100-150 m е около 58 l/s.
- Основното подхранване е от инфилтрация (27 %) от откритите водоеми (20 %), от външни за водосбора части на Палеогенския въгленосен комплекс (също около 20 %), от р. Дивотинска и нейните притоци (17 %), от горнокредния слабоводоносен комплекс (около 13 %). Незначително количество (3 %) постъпва и от р. Струма.
- Дренирането на подземния поток се осъществява в почти равни части към р. Дивотинска, нейните притоци, дерета и извори (24 %); открити водоеми (22 %); съседни водоносни хоризонти (20 %), външни за водосбора части на въгленосния комплекс (19 %) и р. Струма (15 %).

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 (п). Докл. на ДЗЗД „Видекс-Геотехника, Фонд „Мини Перник“ ЕАД (п).
- 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.
- Harbaugh, A., E. Banta, M. Hill, M. McDonald. 2000. Modflow-2000, The USGS modular groundwater model – user guide to modularization concepts and the groundwater flow process. - *Open-File Report 00-92, USGS, VA*, 130.

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