

София, 2017. Sofia

Динамика на подземните води и миграция на арсен в наситената зона на терасата на р. Огоста

Петър Гергинов¹, Алексей Бендерев¹, Димитър Антонов¹, Цветан Коцев², Велимира Асенова²

¹Геологически институт-БАН, e-mail: p.gerginov@mail.bg

²Национален институт по Геофизика, Геодезия и География-БАН, e-mail: tsvetankotsev@mail.bg

Gerginov, P., A. Benderev, D. Antonov, Ts. Kotsev, V. Asenova. Groundwater dynamics and Arsenic migration in the saturated zone of Ogosta River terrace. *Engineering Geology and Hydrogeology*, 31, 53-64.

Резюме. Заливната тераса на р. Огоста е обект на изследване във връзка с повишеното съдържание на арсен в почвите и подземните води. Отношение към проблема има рудодобивната дейност в Чипровския руден район. Изучаването на механизма и степента на замърсяване е свързано с възпроизвеждане на поведението на замърсителите. Основна роля за движението им имат литоложките особености на средата, режимът на реката и падналите валежи в областта. Във връзка с изясняване на миграцията на арсен в подземните води на терасата на р. Огоста са разгледани три представителни участъка в районите на селата Бели Мел, Горна Ковачица, Гаврил Геново. Прогнозирано е движението на основните установени форми на арсена в областта при различни сценарии. За целта на изследването са използвани методите на численото моделиране, с построяване на филтрационни и миграционни модели. Резултатите показват, че AsIII мигрира значително по-бързо във водоносния хоризонт от AsV, но преобладаващата форма на арсена в областта е AsV, която е слабо подвижна. Основна роля за разпространението на арсен в алувиалната тераса на р. Огоста имат водите на реката.

Ключови думи: подземни води, алувиален водоносен хоризонт, хидродинамика, миграция, арсен, р. Огоста

Abstract. The Ogosta River floodplain is a subject of research related to the increased arsenic concentration in soils and groundwater. Previous mining activity in the Chiprovtsi ore region is the main source of pollution in the area. Mechanism and the degree of pollution are related to the lithological features of the environment, river regime and rainfall in the area. Three representative sections close to the villages of Beli Mel, Gorna Kovachitsa, Gavril Genova are considered for estimation of arsenic migration in groundwater in alluvial aquifer. The movement of main forms of arsenic in the area was predicted under different scenarios. For the purpose of the study, numerical modeling methods were used. The results show that AsIII migrates significantly faster in the aquifer compared to AsV, but the predominant form of arsenic in the area is AsV, which is poorly mobile. The Ogosta River is the major source of pollution with arsenic of the alluvial terrace.

Key words: groundwater, alluvial aquifer, hydrodynamics, migration, arsenic, Ogosta River

Въведение

В Чипровската рудна зона са известни находища на рудни полезни изкопаеми, които са експлоатирани от началото на новата ера. Промислен рудодобив през 20-ти век е осъществен в периода 1951–1999 г. В района са изградени три

хвостохранилища, рудничните води на които попадат в р. Огоста и са свързани с преноса на замърсители до яз. Огоста.

Съставеният концептуален модел (Benderev et al., 2015) дефинира основните елементи и въздействия в терасата на р. Огоста. Проведените хидрогеоложки и геофизични проучвания, определените филтрационни параметри на средата, проведените наблюдения върху режима и химическия състав на подземните води дават информацията, използвана при настоящото изследване.

Главната цел на изследването е прогнозиране на разпространението на формите на арсена в подземните води в алувиалните отложения на р. Огоста. Съответно задачите са свързани с изясняване на общата хидрогеоложка обстановка в района, определяне на разпределението на напорите във водоносния хоризонт (решаване на филтрационна задача) и прогнозиране на разпространението на замърсителите (решаване на миграционна задача).

Характеристика на изследвания район

Районът на изследване попада в Северозападна България и обхваща горното течение на р. Огоста, от с. Бели Мел до яз. Огоста.

Разглежданият участък представлява долинно заравнение, издължено в посока северозапад-югоизток с надморска височина, намаляваща плавно от 310 до 185 m в района на язовира. Съвременният релеф в терасата на р. Огоста е фактор за миграцията на арсен, която се осъществява по посока на движение на реката и от по-стръмните участъци на долината към речното корито.

От сливането на р. Чипровска и Превалска при с. Бели Мел до Монтана речната долина на Огоста е с широко долинно дъно (800–1000 m). При движението си реката променя съвременното си корито покрай левия или десния склон на долината.

Основен елемент в морфологията на долинните склонове на р. Огоста са речните тераси. Установени са три надзаливни тераси с височина до няколко десетки метра и две заливни тераси на реката (Иванов, 1964). От значение за настоящото проучване са заливните тераси, които са поделени на ниска и висока. Ниската заливна тераса е разпространена повсеместно по долината. Тя е с височина от 1 до 2,5 m, докато високата тераса е разположена до 3,5 m над реката. Левите долинни склонове са терасирани, а десните са високи и стръмни поради асиметричното развитие на реката.

Долината на р. Огоста е оградена от по-стари скали с мезозойска и неозойска възраст, а най-ниските заравнени участъци са запълнени с кватернерни (алувиални) наслаги, които са обект на настоящото изследване.

Литоложкият строеж на алувиалните наслаги в дълбочина включва песъчливи глини, глинести пясъци, чакъли и валуни. Те са с дебелина до 6 m и залягат върху скали с неогенска възраст – сарматски песъчливи варовици, плиоценски песъчливи глини и глини. Литоложките особености и дебелините на отделните разновидности са изяснени в предишни проучвания на Водпроект и в проведените през 2013 г. геофизични проучвания.

В климатично отношение районът се отнася към умерено-континенталната климатична област. Средногодишните температури варират между 8 и 10°C (Кючукова, 1983). Средногодишната сума на валежите от горното към долното течение на река Огоста е за Чипровци – 756 mm и Монтана – 628 mm. Максимумът на валежите е през месец май–юни, а минимумът е през февруари. Средногодишният брой на дните със снежна покривка за Чипровци е 121 дни, а за Монтана – 98 дни (Колева, Пенева, 1990).

Повърхностните води са основен фактор за преноса на арсен в разглеждания район. Пролетно-лятното пълноводие и есенно-зимното маловодие на р. Огоста оказват влияние върху динамиката и количеството на преминаващия замърсител. Максималните количества в реката възлизат на 40,8 m³/s от септември до април, а през август минимумът, отчетен за Чипровска река е 5,26 m³/s. В река Огоста съществуват плаващи наноси, които са с различна големина, форма и размери. Те

са резултат от изнасянето на изветрителните продукти от водосбора и от ерозията на речното легло. По време на приижданията, най-често през юни, реката залива ниската тераса. Вследствие се отлагат наноси, които са били силно замърсени от работещите рудници.

В алувиалните отложения на река Огоста има ясно изразен водоносен хоризонт от порови подземни води (Антонов и др., 1980). Те са ненапорни по характер, формирани на малка дълбочина (1–4 m под терена) и са в пряка хидравлична връзка с реката. Поради тази причина те са силно уязвими към замърсяване.

Хидрогеоложки условия

Разглежданата област е със значителна дължина – около 16 km в посока запад–изток и малка дебелина на алувиалната тераса – 6 m. Разликата в котите на терена (125 m от западния до източния край) превишава многократно дебелината на водоносните формации.

Река Огоста се явява главна дренажна артерия на подземните и повърхностните води в разглеждания район. От хидрогеоложка гледна точка тя може да бъде приета като граница от I род. Страничният приток на подземни води от речните склонове е формиран в зависимост от литоложките и геоложките особености на терена.

Алувиалният водоносен хоризонт на реката граничи със следните комплекси: делувиален, пролувиален и колувиален комплекс; неогенски карстов комплекс; неогенски комплекс; кремен водоносен комплекс с пукнатинни води и кремен водоупор.

Подхранването на подземните води в разглеждания район се осъществява и площно от инфилтрация на валежни води.

Динамиката на подземните води в терасата на р. Огоста се определя от режима на реката. Покачването на нивото ѝ влияе обикновено в рамките на заливната тераса и само в редки случаи това влияние се простира по-широко. Следователно основната роля на реката се изразява в дренирането на водосборната област и епизодично, в тесни граници от подхранването на подземните води в близост до нея.

Работещите водоземни съоръжения, в т.ч. кладенци в населени места, единични действащи кладенци и дренажни системи оказват локално влияние на хидродинамичната картина.

Анализираните химични проби от подземните води показват наличие на арсен в различни точки от терасата на р. Огоста, като са отделени концентрации на срещаните AsIII и AsV форми. Същевременно са взети и водни проби от речни води, които са основа за разработването на сценарии с постъпване на замърсители от речна вода в алувиалните терасни отложения.

Движението на арсена в проучвания район е обусловено от съществуващите хидроложки и хидродинамичните условия, като времето за придвижване на замърсителя е свързано с миграционните параметри на водоносния хоризонт.

Известно е, че AsIII се придвижва по-бързо във водоносните интервали в сравнение с AsV. Моделирането на движението му маркира максималните разстояния, които замърсителят може да измине във водоносния хоризонт.

Механизмът на проникване на замърсители в терасата на р. Огоста е свързан с промяната в нивата на реката. При високи водни стоежи, със заливане на терасата, арсенът от речните води прониква в обикновено сухи и незаливаеми по-високи и далечни участъци. Същевременно повишените нива на подземните води активизират хоризонталното подземно придвижване на арсена от терасата към реката. Преобладаващи са умерените колебания на р. Огоста (без заливане на терасата), които осъществяват тези процеси в тесни участъци до реката.

Използвани методи

Движението на замърсителите в подземните води се определя от хидрогеоложката обстановка (Appeld, Postma, 2004, Лехов, 2010). Използването на специализиран

софтуер прави възможно съставянето на цифрови хидрогеоложки модели, съдържащи филтрационна и миграционна част. Първоначално са симулирани хидродинамичните условия във водоносния хоризонт и е определено разпределението на напорите в резултат на различни въздействия. Миграционните модели разглеждат движението на замърсителите във филтрационната среда на базата на получената структура на подземния поток.

В настоящото изследване хидродинамичните условия във водоносния хоризонт са моделирани чрез използване на MODFLOW и PEST, като модул от комплексния геоложки софтуер GMS 6.0 (Groundwater Modeling System) и е определено разпределението на напорите в резултат на различни въздействия. Миграционните модели са симулирани с MT3DMS. Подобни подходи, но за други замърсители в България са прилагани от Стоянов (2005, 2006, 2008, 2010, 2012).

Във връзка с изясняване на движението на арсена в терасата на р. Огоста са разгледани три представителни участъка в районите на селата Бели Мел, Горна Ковачица, Гаврил Геново. Прогнозирано е движението на замърсителя при следните сценарии:

- (1) Движение на AsIII в алувиалния водоносен хоризонт към р. Огоста.
- (2) Движение на AsIII и AsV от р. Огоста към алувиалния водоносен хоризонт.

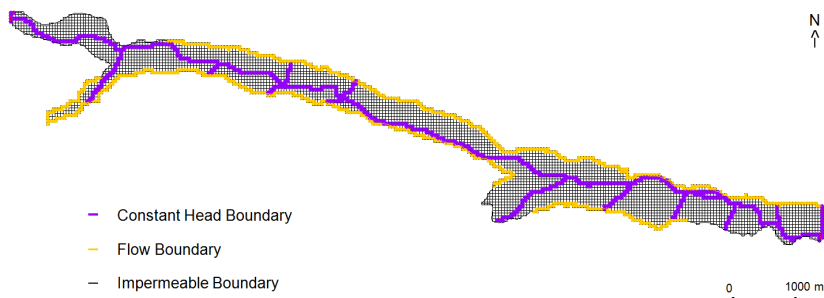
При моделирането местата на постъпване на замърсителя във водоносния хоризонт са избрани с оглед най-интензивните в хидродинамично отношение участъци от речната тераса. Те са пряко свързани и с очертаването на заливаемите територии, които играят важна роля при процеса на разтваряне на замърсители.

Прогнозирана е посоката на движение на арсен и разстоянието, което различните му форми изминават в пласта за определено време.

Филтрационен модел

Хидрогеоложкият модел за движението на подземните води в терасата на р. Огоста се базира на геоложката и тектонската обстановка, хидрогеоложките условия и количествата на падналите валежи в разглежданата част от водосборната област.

Обект на изследване са силно проводящите, кватернерни алувиални чакъли и пясъци в терасата на р. Огоста. Филтрационна област е дискретизирана чрез равномерна моделна мрежа с размери на клетката 50 x 50 m (фиг. 1).



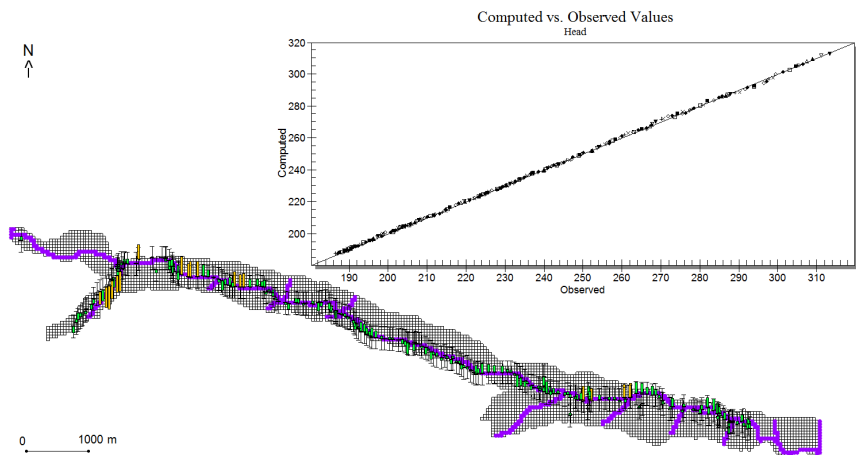
Фиг. 1. Моделна мрежа и гранични условия за изследвания район

Fig. 1. Model area and boundary conditions

Река Огоста и основните ѝ притоци са моделирани като граници с постоянно водно ниво, което отговаря на абсолютните им коти, измерени при наблюденията. Денивелацията в котите на реките между най-западната и източна точка на разглежданата област е 125 m.

От север и юг са зададени граници от II род с постоянен поток. Те са очертани съобразно геоложките особености на частта от разглеждания водосбор. Интензитетът на инфилтрационното подхранване, зададен в моделната област, е $W=0,00021 \text{ m/d}$.

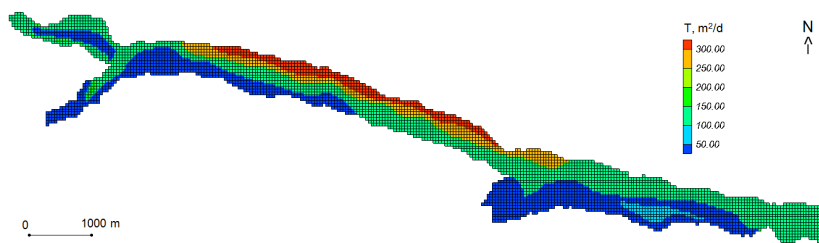
Първоначално използваният подход при моделирането включва използването на модула PEST за плътно определяне на филтрационните параметри в разглежданата област. Процесът е свързан с получаване на такива стойности, при които моделните резултати за хидродинамиката да отговарят на действително измерените нива на подземните води (фиг. 2).



Фиг. 2. Използвани точки за сравнение на водните нива и калибрационна крива
Fig. 2. Calibration curve and location of observation points for groundwater level

Използвани са 213 точки за калибрация на моделното решение, като голяма част от тях са точки с коти на реката. Последните използват информацията от топографското заснемане при отделянето на геоморфоложките единици в заливната тераса на р. Огоста (Tcherkezova, 2015).

Получаването на стойностите за филтрационните параметри в цялата моделна област (фиг. 3) е основа за симулиране на реалните хидродинамични условия.

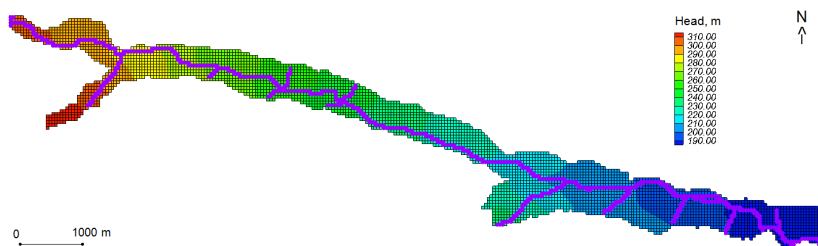


Фиг. 3. Стойности на проводимостта, получени от симулация с PEST
Fig. 3. Transmissivity values from PEST simulation

Използваният модел е стабилизирано решение, което показва добро съвпадение между получените и реално измерените водни нива. На фиг. 4 е представено моделно решение по отношение на напорите на подземните води в цялата област.

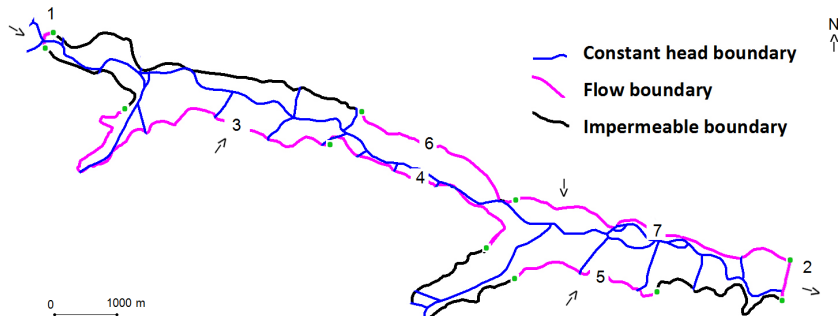
Основната посока на движение на подземните води е от запад на изток, като р. Огоста има решаващо значение за хидродинамиката в района.

Балансът на подземните води отразява интензитета на страничен приток в моделната област по участъци (фиг. 5, табл. 1).



Фиг. 4. Хидродинамична карта, получена от стабилизирано решение с MODFLOW

Fig. 4. Hydrodynamic map result of steady state MODFLOW simulation



Фиг. 5. Гранични условия, зададени при филтрационния модел (стрелки – посоки на потока, числа – номер на участъци)

Fig. 5. Boundary conditions set in the filtration model (arrows – flow directions, numbers – number of plots)

Табл. 1. Балансови елементи на потока в моделната област

Table 1. Balance flow elements in the model area

Участък	Тип граница	Дължина, m	Приток, l/s	Геоложки индекс
1	П род	550	2,54	aQh
2	П род	890	-4,12	aQh
3	П род	6500	7,00	pr-dQh
4	П род	4500	3,64	bN ₁ ^b
5	П род	3600	2,93	bN ₁ ^b
6	П род	4000	3,79	bN ₁ ^b
7	П род	6000	2,77	5K ₁ ^{b-ap}
Общо		26040	18,55	

Общият приток от подземни води в областта плюс притока от западната граница (подземни води подруслово) възлиза на 22,67 l/s.

Миграционни модели

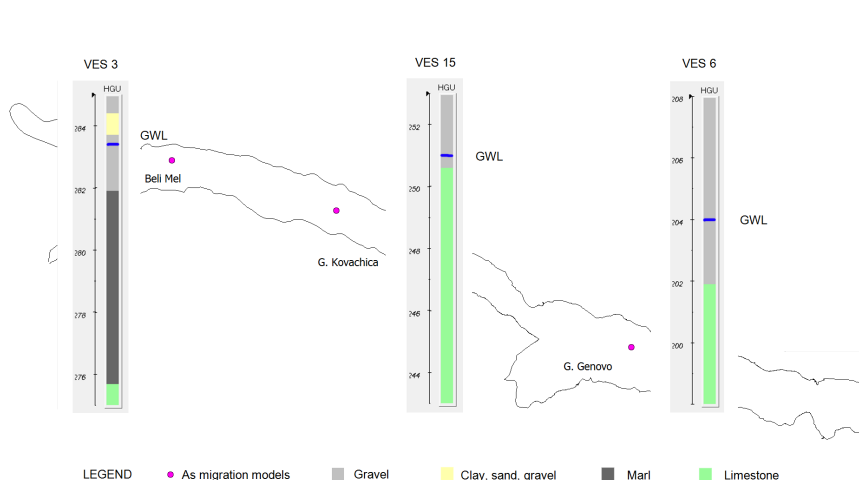
Миграционните модели представят тримерно движението на замърсителите в алувиалния водоносен хоризонт, с които е прогнозирано движението на замърсителя при определени сценарии.

Тези модели са реализирани с помощта на програмния пакет MT3DMS, в който е използвана същата пространствена дискретизация на моделната област, както при филтрационните модели. Приложената изчислителна схема отчита конвективния пренос на вещество, сорбцията, хидродинамичната дисперсия и смесването.

Коефициентите на разпределение (K_d), използвани при изчисленията, са взети по литературни данни с оглед литоложката характеристика на средата и типа на замърсителя. За AsIII е използвана средна стойност на K_d – 5 l/kg (Jung et al., 2012). За AsV е използвана средна стойност на K_d – 2000 l/kg (Ghosh et al., 2003).

Сценарий 1

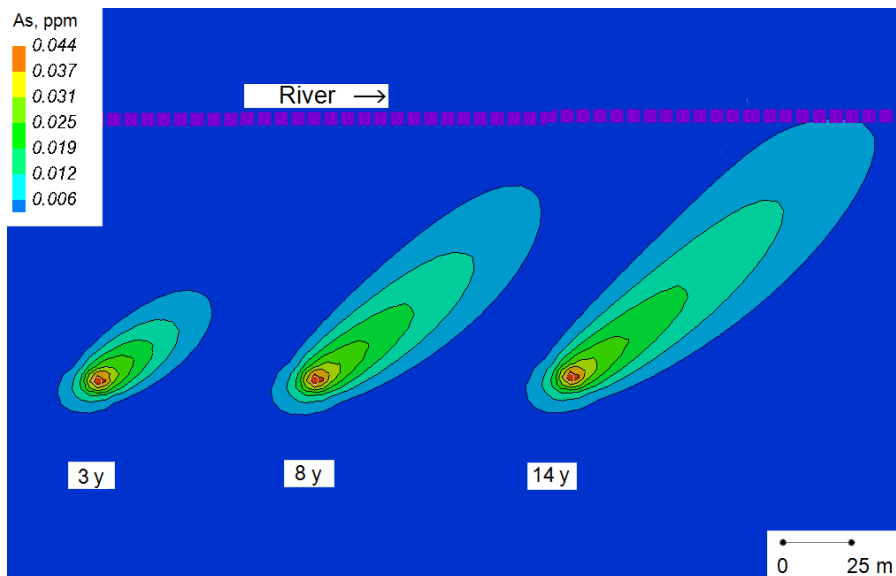
Движението на AsIII в алувиалния водоносен хоризонт към р. Огоста е моделирано в 3 участъка – в районите на селата Бели Мел, Горна Ковачица и Гаврил Геново. Местоположението и характерната литология на площадките може да се проследи на фиг. 6.



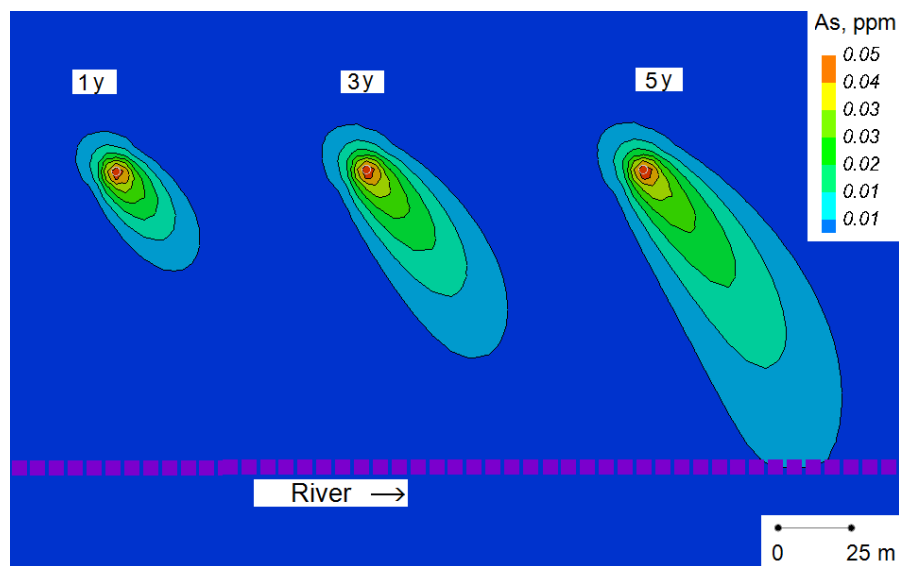
Фиг. 6. Характерни участъци, за които е моделирано придвижването на AsIII от алувиалния хоризонт към р. Огоста.

Fig. 6. Simulation of AsIII migration in direction from the alluvial aquifer to the Ogosta River in characteristic areas

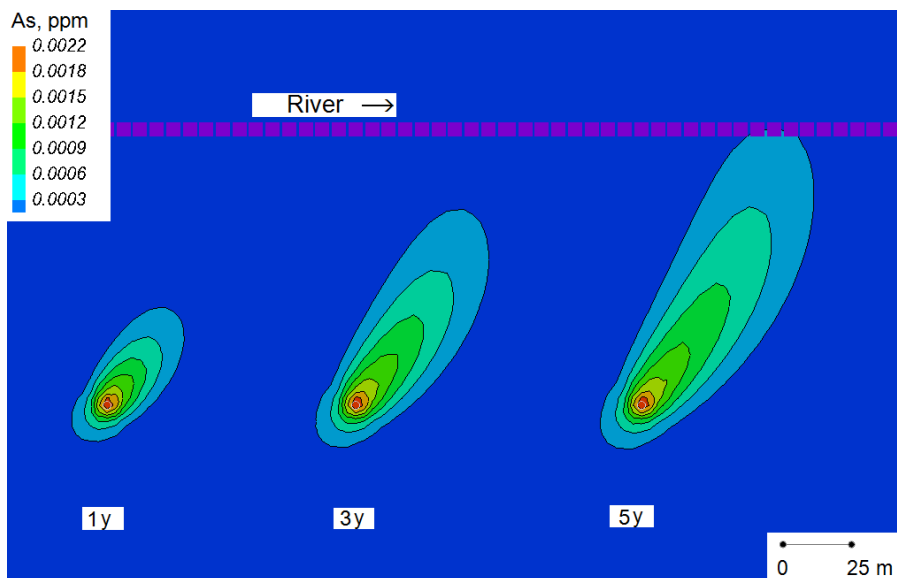
Началните концентрации на замърсителите във водоносния хоризонт са взети по данни от извършените за настоящото изследване химически анализи на подземните води. Стойностите им са както следва: за Бели Мел – 44,8 ppb, Горна Ковачица – 56,3 ppb и Гаврил Геново – 2,47 ppb. Симулация на движението на замърсителите във водоносния хоризонт е представена на фиг. 7, 8, 9. Моделът отразява процеса на постоянното отмиване на замърсител от водоносния хоризонт и движението му към реката.



Фиг. 7. Моделно решение за движението на As^{III} за района на с. Бели мел
 Fig. 7. Model solution of As^{III} migration in the area of Beli Mel village



Фиг. 8. Моделно решение за движението на As^{III} за района на с. Горна Ковачица
 Fig. 8. Model solution of As^{III} migration in the area of Gorna Kovachitsa village

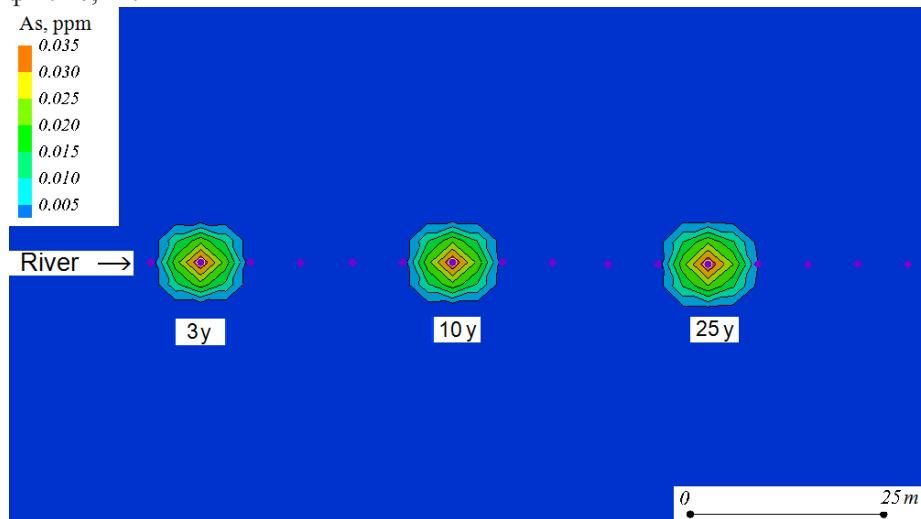


Фиг. 9. Моделно решение за движението на AsIII за района на с. Гаврил Геново

Fig. 9. Model solution of AsIII migration in the area of Gavril Genovo village

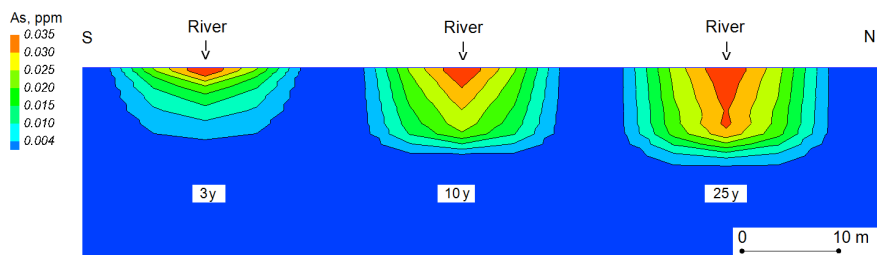
Сценарий 2

Този сценарий е свързан с постъпването на AsIII и AsV от р. Огоста към алувиалния водоносен хоризонт. Като начални концентрации са приети осреднени от всички измерени стойности за реката – 5,9 и 40,3 ppb, съответно за AsIII и AsV. Симулирано е замърсяване от реката в представителен участък в близост до с. Гаврил Геново. Картината на движение на AsV в план и разрез е представена на фиг. 10, 11.



Фиг. 10. Моделно решение в план за постъпването на AsV от р. Огоста за района на с. Гаврил Геново

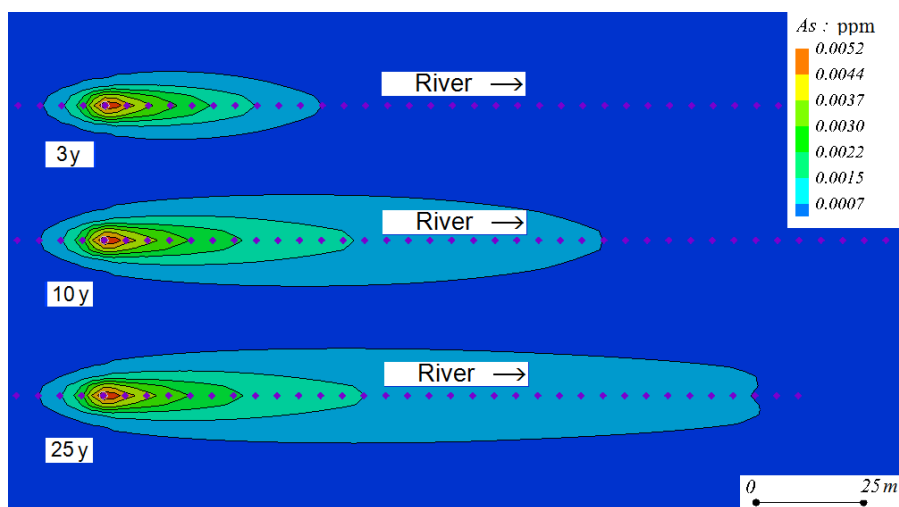
Fig. 10. Model solution in plan view for AsV migration from the Ogosta River, for the area of the village of Gavril Genovo



Фиг. 11. Моделно решение в разрез за постъпването на AsV от р. Огоста за района на с. Гаврил Геново
 Fig. 11. Model solution in cross section for AsV migration from the Ogosta River for the area of the village of Gavril Genovo

Характерно за Сценарий 2 е незначителното хоризонтално движение на замърсителя, поради високите стойности на коефициента на разпределение – K_d , дори за дълги прогнозни периоди.

Прогнозата за движението на AsIII от реката към алувиалния водоносен хоризонт е визуализирана на фиг. 12.



Фиг. 12. Моделно решение за постъпването на AsIII от р. Огоста за района на с. Гаврил Геново
 Fig. 12. Model solution for the AsIII inflow from the Ogosta River to the area of the village of Gavril Genovo

Заклучение

Използването на методите на численото моделиране прави възможно построяването на хидродинамични модели, които изясняват движението и баланса на подземните води. Те представят посоката и градиентите на потока в алувиалния водоносен хоризонт за участъка от селата Бели Мел до Гаврил Геново на р. Огоста.

Хидродинамичните модели са основа за прогнозиране движението на арсен в разглежданата област. Разделянето на общия арсен на отделни компоненти с различни валентности – AsIII и AsV, дава възможност за прилагане на различни сценарии, които очертават фронтовете на замърсяване за отделни периоди. Концентрациите на замърсителите, които са заложили при моделните решения, са определени чрез актуални наблюдения на качествата на подземните и речните води.

Резултатите от филтрационните модели са следните:

- Изяснена е хидродинамиката на подземните води в терасата на р. Огоста, включително посоката и градиентите на потока в района;
- Чрез използване на модула PEST са получени стойности на проводимостта във всички зони на моделната област, които варират от 50 до 350 m²/d;
- Динамиката на подземните води в терасата на р. Огоста се влияе значително от режима на реката;
- Страничните притоци от подземни води се формират по границите на речната тераса със следните комплекси: делувиялен, пролувиялен и колувиялен комплекс; неогенски карстов комплекс; неогенски комплекс; креден водоносен комплекс с пукнатинни води. Общият приток от подземни води в областта, плюс притокът от западната граница (подземни води под руслото на реката) възлиза на 22,67 l/s.
- Основното количество вода, което постъпва в алувиалната тераса, е предимно от реката и надвишава страничния поток на подземни води.

Резултатите от миграционните модели са следните:

- Миграционните модели симулират движението на AsIII и AsV въз основа на хидродинамичните условия в алувиалната тераса на р. Огоста. Приложената изчислителна схема отчита конвективния пренос на вещество, сорбцията, хидродинамичната дисперсия и смесването. Началните концентрации на замърсителите са приети според резултатите от химическите анализи на речните и подземните води;
- Прогнозирано е движението на замърсителя при следните сценарии – миграция на AsIII в алувиалния водоносен хоризонт към р. Огоста и миграция на AsIII и AsV от р. Огоста към алувиалния водоносен хоризонт;
- Движението на замърсителите е симулирано в отделни точки от речната тераса, които са свързани с характерни участъци от водоносния хоризонт – в района на селата Бели Мел, Горна Ковачица и Гаврил Геново. Това са зони с активен водообмен, влияещи се пряко от режима на реката и с най-високи филтрационни свойства. Постъпилите в пласта замърсители мигрират косо на реката и следват естествената посока на движение на подземните води;
- По сценарий 1, в зависимост от литологията и хидравличните градиенти в пласта, AsIII изминава 100 m до р. Огоста за 14, 5 и 5 години съответно за Бели Мел, Горна Ковачица и Гаврил Геново;
- По сценарий 2, постъпващият от реката в алувиалния хоризонт AsIII изминава 170 m за период от 25 г. в посока от запад на изток. AsV се придвижва едва няколко метра за 25 г. в същата посока;
- Движението на замърсителя във вертикална посока обхваща предимно силнопроводящите, чакълести интервали на разреза. Миграцията се забавя в изветрелите части на подложката и достига до по-плътните отложения, които се считат за водоупор.

Общите заключения, които могат да бъдат направени, са следните: AsIII се движи значително по-бързо във водоносния хоризонт от AsV поради различните стойности на коефициента на разпределение K_d. Преобладащата форма на арсена в разглежданата област е AsV, което прави замърсителя много слабо подвижен. Основна роля за разпространяването на арсен в алувиалната тераса на р. Огоста имат водите на реката, като притокът от подземни води и ролята им в отлагането и разтварянето на замърсителя е незначителна.

Благодарности

Настоящите изследвания са изготвени по проект „Arsenic contamination of Ogosta river: Linking biogeochemical processes in floodplain soils with river system dynamics – Grant Application to the Bulgarian-Swiss Research Programme (BSRP)“ 2011-2016.

Литература:

- Антонов, Хр., Д. Данчев. 1980. *Подземни води в НРБ*. София, ДИ „Техника“. 360 с.
- Иванов, П. 1964. Развитие на р. Огоста от спирка Живовци до Михайловград. *Сп. БГД*, год. 25, кн. 3, 81-85.
- Колева, Е., Р. Пенева. 1990. *Климатичен справочник: Валежи в България*. Изд. БАН. 169 с.
- Кючукова, М. (ред.) 1983. *Климатичен справочник за НР България*. Т. 3. Температура на въздуха, температура на почвата, слана. София, Изд-во Наука и изкуство. 440 с.
- Лехов, А. 2010. *Физико-химическа хидрогеодинамика*. Москва, КДУ, 500 с.
- Стоянов, Н. 2005. Математически модел на условията за движение на замърсителите в подповерхностното пространство на площадката за временно депо за битови отпадъци „Кремиковци“. *Сп. „БУЛАКВА“*, бр. 4, 47-53.
- Стоянов, Н. 2006. Математическо моделиране на замърсяването на подземните води. *Сп. „БУЛАКВА“*, бр. 2, 24-29.
- Стоянов, Н. 2008. Естествена защитеност от повърхностни замърсители на Палеогенския карстов водоносен хоризонт в района на гр. Чирпан, участък „Бялата вода“. Част 2. Математически модел за прогнозиране на миграцията на замърсителите в зоната на аерация и във водонаситената зона. *Год. МГУ „Св. Ив. Рилски“*, София, т. 51, Геол. и геоф., 165-170.
- Стоянов, Н. 2010. Условия за миграция на несорбируеми замърсители в неводонаситената зона на палеогенските вулкани в района на гр. Хасково. Част 2. Математически модел. *Год. МГУ „Св. Ив. Рилски“*, София, т. 53, Геол. и геоф., 169-174.
- Стоянов, Н. 2012. Моделни изследвания на риска от замърсяване на геоложката основа и подземните води от проектираното Национално хранилище за радиоактивни отпадъци край АЕЦ „Козлодуй“. *Год. МГУ „Св. Ив. Рилски“*, София, т. 55, Геол. и геоф., 140-145.
- Appelo, C.A.J., D. Postma. 2004. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, Second Edition. Balkema Publisher. 655 p.
- Benderev, A., P. Gerginov, D. Antonov, N. Van Meir, R. Kretzschmar. 2015. Conceptual hydrogeological model of the Ogosta River floodplain (Western Balkan, Bulgaria) and its application for predicting groundwater contamination with arsenic. *15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015 Conference Proceedings*, ISBN 978-619-7105-32-2 / ISSN 1314-2704, June 18-24, 2015, Book 1, Vol. 2, 195-202.
- Ghosh, R., W. Deutsch, S. Geiger, K. McCarthy, and D. Beckmann. 2003. Geochemistry, Fate and Transport of Dissolved Arsenic in Petroleum Hydrocarbon-Impacted Groundwater. In: *Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater*, Costa Mesa, California, 19-22.
- Jung, H., B. Bostick, Y. Zheng. 2012. Field, Experimental, and Modeling Study of Arsenic Partitioning across a Redox Transition in a Bangladesh Aquifer. *Environmental Science Technology*, 46 (3), 1388-1395.
- Tcherkezova, E. 2015. GIS-based delineation and regionalization of geomorphographic units in the floodplain of Ogosta River between the settlement Gavril Genovo and the “Ogosta” reservoir (NW-Bulgaria). *Problems of Geography* 1-2, BAS, 114-122.

Постъпила: 01.11.2017

Received: 1 November 2017

Приета: 18.12.2017

Accepted: 18 December 2017