

ДОКЛАД

относно изпълнението на задача на тема:

МОДЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ОЦЕНКА НА ПОТЕНЦИАЛНОТО
ВЪЗДЕЙСТВИЕ ВЪРХУ ПОДЗЕМНИТЕ И ПОВЪРХНОСТНИТЕ ВОДИ ПРИ
СТРОИТЕЛСТВОТО И ЕКСПЛОАТАЦИЯТА НА СИСТЕМАТА ЗА
УПРАВЛЕНИЕ НА ОТПАДЪЦИТЕ ОТ ПРЕРАБОТВАНЕТО НА ПОЛЕЗНИТЕ
ИЗКОПАЕМИ ОТ НАХОДИЩЕ „МИЛИН КАМЪК“, ГРАД БРЕЗНИК

СЪСТАВИЛИ:

проф. д-р Николай Стоянов

доц. д-р Димитър Антонов

УПРАВИТЕЛ:

проф. д-р Стефчо Стойнев

С Ъ Д Ъ Р Ж А Н И Е

ПРЕДГОВОР	4
1. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯ ОБЕКТ	6
1.1. Местоположение	6
1.2. Релеф	6
1.3. Климат	7
1.4. Геоложки строеж	8
1.5. Повърхностни води	10
1.6. Подземни води	12
1.7. Източници за питейно водоснабдяване. Санитарно-охранителни зони.	15
1.8. Технологични условия	17
1.8.1. Хвостохранилище	17
1.8.2. Контактен водоем	18
1.8.3. Закриване на съоръженията и рекултивация	18
2. КОНЦЕПТУАЛЕН МОДЕЛ	21
2.1. Източници на замърсяване и реципиенти. Ключови замърсители.	21
2.2. Граници и елементи на миграционното поле. Моделна област.	23
2.3. Инженерни бариери и зона на аерация под източниците	24
2.4. Водонаситена зона	26
2.4.1. Хидрогеоложки единици	26
2.4.2. Хидродинамични свойства и миграционни характеристики	28
2.4.3. Структура на филтрационното поле	30
2.4.4. Хидравлични връзки	31
2.5. Външни и вътрешни гранични условия. Източници и стокове.	31
2.5.1. Реки	31
2.5.2. Инфилтрация от валежите	32
2.5.3. Подземен приток/отток по латералните граници	32
2.5.4. Приток на техногенни води	32
2.5.5. Потенциално застрашени водоизточници за питейни води	33
3. МОДЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ПРОГНОЗИ	33
3.1. Методически бележки	33
3.2. Едномерни (1D) модели на условията за миграция на ключовите замърсители през инженерните бариери и зоната на аерация	34
3.2.1. Методика и инструменти	34
3.2.2. Композиране на едномерните модели	35
3.2.2.1. Концептуални схеми и характеристики на основните модели	35
3.2.2.2. Моделни рамки и имплементация на концептуалните схеми	42
3.2.2.3. Варианти на основните модели	42
3.2.2.4. Допълнителни варианти с отчитане на всички инженерни бариери ..	42

3.2.3. Резултати от моделните изследвания	43
3.2.4. Анализ на резултатите от едномерните модели	43
3.3. Тримерни (3D) прогнозни модели на възможното замърсяване на подземните и повърхностните води	50
3.3.1. Основен филтрационен 3D модел	50
3.3.1.1. Методика и инструменти	50
3.3.1.2. Композиране на основния филтрационен модел	51
3.3.1.3. Калибриране на модела	52
3.3.1.4. Моделни решения – структура на подземния поток и воден баланс.	53
3.3.2. Миграционни 3D модели на движението на SO ₄ и As	59
3.3.2.1. Методика и инструменти	59
3.3.2.2. Композиране на миграционните модели	60
3.3.2.3. Моделни решения за възможната миграция на SO ₄ и As	61
3.3.3. Анализ на резултатите от тримерните прогнозни модели	62
3.4. Обобщение на резултатите от моделните изследвания. Основни изводи.	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
Литература	85

ПРЕДГОВОР

Проведените моделни изследвания за оценка на потенциалното въздействие върху подземните и повърхностните води при строителството и експлоатацията на системата за управление на отпадъците от преработването на полезните изкопаеми от находище „Милян камък“, гр. Брезник са изпълнени в съответствие с Договор №: Д 3-ТР-4/23.01.2026 г. между възложителя “БРЕЗНИК МИНЕРАЛС” ЕООД и изпълнителя ГЕОТЕХНИКА АБС ООД. Провеждането на тези изследвания се налагат във връзка с направените промени в одобреното инвестиционно предложение на “БРЕЗНИК МИНЕРАЛС” ЕООД, предвиждащи нова екологосъобразна технология за изграждане и експлоатация на съоръжения за трайно съхранение на отпадъците от преработването на полезните изкопаеми от находище „Брезник“, а именно депониране в насипен тип хвостохранилище, включително и частична промяна на границите на площадката за хвостохранилище и контактния водоем.

Основна цел на договорната задача е посредством компютърни модели, при отчитане на новата технология за утилизация на отпадъците да се направи дългосрочна прогнозна оценка за размерите и степента на възможното въздействие или замърсяване на подземните и повърхностните води от хвостохранилището и контактния водоем при екстремната хипотеза, че повечето от инженерните бариери не изпълняват своите защитни функции. Разработени са и модели, включващи предвидените в проекта водонепроницаеми геомембрани, с които се демонстрира отсъствието на течни емисии извън границите на двете съоръжения през целия експлоатационен период и след тяхната рекултивация.

Във връзка с изпълнението на договора са извършени следните видове дейности:

- Обработка на наличната информация за климатичните, геоморфоложките, хидрографските, геолого-тектонските, хидрогеоложките и техногенните условия в района на обекта, както и на данни за добива на води за питейно водоснабдяване, включително за санитарно-охранителните зони около водоизточниците в района.
- Систематизиране на предоставените от Възложителя сведения за изпълнявания собствен мониторинг върху валежите и температурата на въздуха; новата технология за изграждане, експлоатация и рекултивация на хвостохранилището и контактния водоем; проектните характеристики на инженерните противифилтрационни бариери и на депонирания красен отпадъчен продукт или т.нар. филтриран отпадък (кек); вида на съдържащите се в депонирания отпадък потенциални замърсители и др.
- Комплексен анализ и систематизиране на резултатите от проведените в периода 2018-2023 г. детайлни инженерногеоложки и хидрогеоложки проучвания на отредените за хвостохранилище и контактен водоем площадки и прилежащите им територии, допълнени с цитирани в литературните източници данни за хидродинамичните и миграционни характеристики на подобен вид отпадък, противифилтрационни бариери и литоложки разновидности, съставляващи естествения геоложки разрез.
- Съставяне на общ концептуален модел на хидрогеоложките и техногенните условия в обхвата на изследвания обект като са ясно дефинирани неговите основни архитектурни елементи – граници и елементи на миграционното поле; източници на замърсяване и реципиенти; ключови замърсители; инженерни бариери и зона на аерация под източниците; водонаситена зона; източници и стокове; външни и вътрешни гранични условия.
- Разработване на числени едномерни (1D) модели, с които е направена количествена оценка на задържащата способност на инженерните бариери и зоната на аерация под хвостохранилището и контактния водоем. Изчислени са скоростта и големината на

инфилтрационния поток под потенциалните източници и концентрацията на постъпващите от тях ключови замърсители (SO_4 и As) на границата ненаситена/водонаситена зона. С едномерните модели, посредством компютърна програма Hydrus, е симулиран вертикалният инфилтрационен поток и преноса на вещество през хидрогеоложкия разрез в шест характерни точки, пет от които в обхвата на хвостохранилището и една в контактния водоем. Получените решения са ползвани и като входни данни в миграционните 3D модели.

- Разработване на числен филтрационен 3D модел на водоносния комплекс в границите между р. Брезнишка и р. Дабовица и в разреза до дълбочина 40-50 m. При неговото композиране е използван съставения концептуален модел и компютърната програма Modflow, която ползва числено решение по крайни разлики на уравнението на тримерната филтрация. С този модел се симулира пространствената структура на филтрационното поле, която еднозначно определя условията за конвективен пренос на вещество и се ползва като база в разработените миграционни 3D модели.
- Разработване на числени миграционни 3D модели, представляващи компютърна симулация на условията за движение на ключовите замърсители SO_4 и As в подземните води от потенциалните източници до р. Брезнишка и р. Дабовица. Като входни данни се използват приетите в концептуалния модел допускания и резултатите от едномерните модели. Миграционните модели са композирани с компютърна програма MT3D-MS, чийто алгоритъм използва числено решение на основното уравнение за пренос на вещество във водонаситена среда.
- Въз основа на резултатите от моделните изследвания е направена дългосрочна прогноза за възможното въздействие или замърсяване на подземните и повърхностните води от хвостохранилището и контактния водоем при екстремната хипотеза, че част от инженерните бариери не изпълняват своите защитни функции. На тази база е формулирано и генералното заключение за риска от замърсяване на водите и почвите по време на експлоатацията и след закриването на двете съоръжения.

При изпълнението на задачата са използвани: (1) Данни от всички предишни геоложки, хидроложки и хидрогеоложки проучвания в района на изследвания обект; (2) Проектна документация за технологията на изграждане, експлоатация и рекултивиране на хвостохранилището и контактния водоем; (3) Протоколи с резултатите от направените лабораторни изследвания на крайния отпадъчен продукт, който ще се депонира в хвостохранилището; (4) Актуална информация за състоянието, управлението и експлоатацията на подземните и повърхностните води от Басейнова дирекция „Западнобеломорски район“ (БД ЗБР), „ВиК“ ООД – Перник и „Напоителни системи“ ЕАД - Клон „Струма-Места“ – ХТР Перник; (5) Литературни източници, фондови материали, нормативни документи, интернет източници и специализиран софтуер, тясно свързани с тематиката на проведените изследвания.

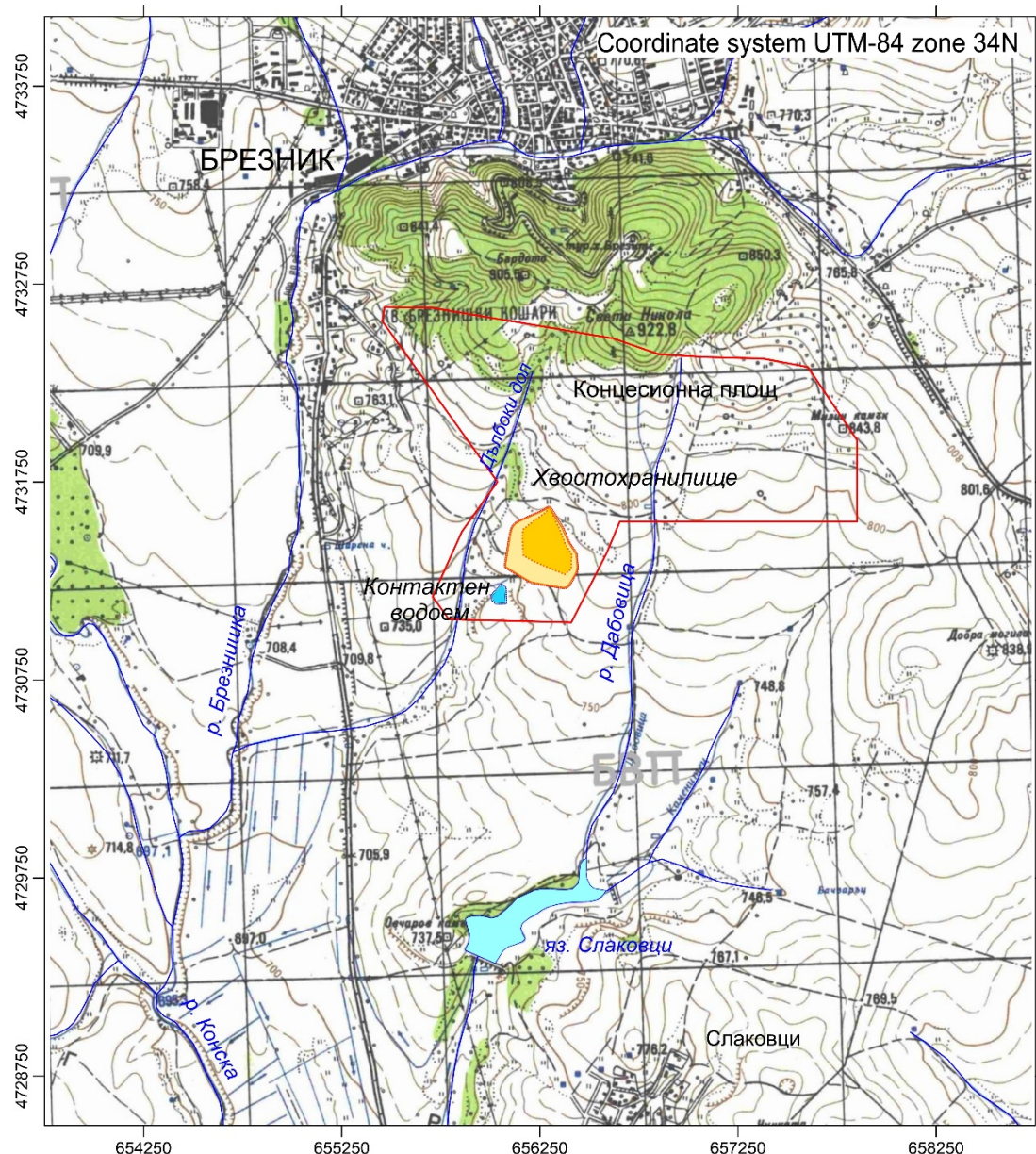
Възложител и инвеститор на задачата е “БРЕЗНИК МИНЕРАЛС” ЕООД.

Моделните изследвания и изготвянето на отчетния доклад са изпълнени от екип на „ГЕОТЕХНИКА АБС“ ООД.

1. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯ ОБЕКТ

1.1. Местоположение

В регионален план изследваният обект се намира в Западна България. Концесионната площ на рудник „Милин камък“, в чиито очертания са ситуирани площадките на хвостохранилището и контактния водоем, се разполага на юг от гр. Брезник, в най-южните склонове на възвишението „Бърдо“ (Фиг. 1).



Фиг. 1. Местоположение на проучвания обект
(Топографската карта на България М 1:25000, картен лист Брезник)

1.2. Релеф

Територията в района на гр. Брезник се отличава с разнообразни релефни форми – както планински, така и котловинни. Най-голямата котловина е Брезнишката, която е заобиколена от планините Вискяр, Завалска, Черна гора и Любаш. Най-високият връх е „Момин двор“ в планината Любаш (1399 m). В обсега на изследваната територия най-високата точка е връх „Св. Никола“ – 923 m.

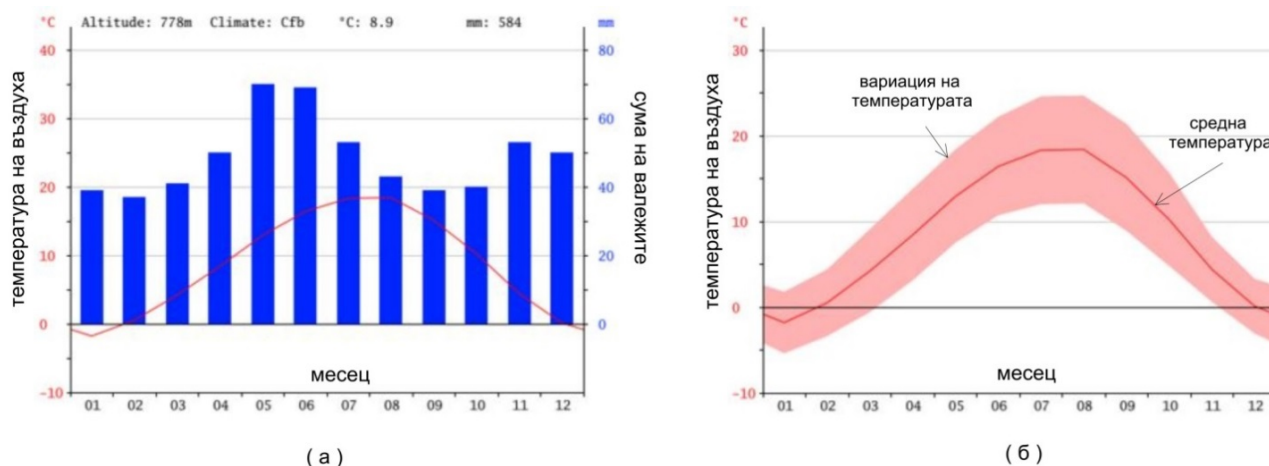
Надморската височина на строителната площадка, върху чиято площ се предвижда да се изградят двете съоръжения за депониране на отпадъците, варира между 740 m в южната част до около 780 m – в северната, при среден наклон на терена около 7 %.

1.3. Климат

Климатът в района е умерено континентален. Зимата е студена, средномесечната температура за месец януари е $-1,8^{\circ}\text{C}$. Лятото е топло, като максималните температури са през месеците юли-август (средна температура $18,4^{\circ}\text{C}$). Средногодишната температура на въздуха е $8,9^{\circ}\text{C}$. Средногодишната сума на валежите е 584 mm (ХМС Брезник). Снежната покривка е около 80 дни годишно. Разпределението на средномесечните валежи и температури на въздуха е представено в Табл. 1 и на Фиг. 2.

Таблица 1. Данни за валежите и температурата на въздуха – ХМС Брезник

Месец	Средномесечна сума на валежите, mm	Средномесечна температура на въздуха, $^{\circ}\text{C}$
януари	39	-1,8
февруари	37	0,5
март	41	4,2
април	50	8,4
май	70	12,9
юни	69	16,4
юли	53	18,3
август	43	18,4
септември	39	15,1
октомври	40	10,2
ноември	53	4,4
декември	50	0,1
Средногодишни стойности	Средногодишна сума на валежите, mm	Средногодишна температура на въздуха, $^{\circ}\text{C}$
	584	8,9



Фиг. 2. Средномесечни валежи и температури за района на гр. Брезник

1.4. Геоложки строеж

Разглежданият район има много сложен геоложки строеж. На къси разстояния в план и разрез е налице честа смяна на литоложкия състав и генетичния тип на скалите. Хроностратиграфският диапазон обхваща геоложки формации с горнокредна, палеогенска, неогенска и кватернерна възраст (*Маринова и др., 2010*).

Горна креда

Основните геоложки единици в района на хвостохранилището и контактния водоем са *туфитно-мергелната задруга ($m-tK_2$)* и няколко формации от състава на Бабския вулкански комплекс – *пирокластична задруга ($BabtK_2$)*, *пачка на псамито-алевролитовите туфи ($Babt/1K_2$)* и *едропорфирни латити и трахити ($ValtK_2$)*. Повърхностните разкрития и граници на тези геоложки единици са представени на Фиг. 3.

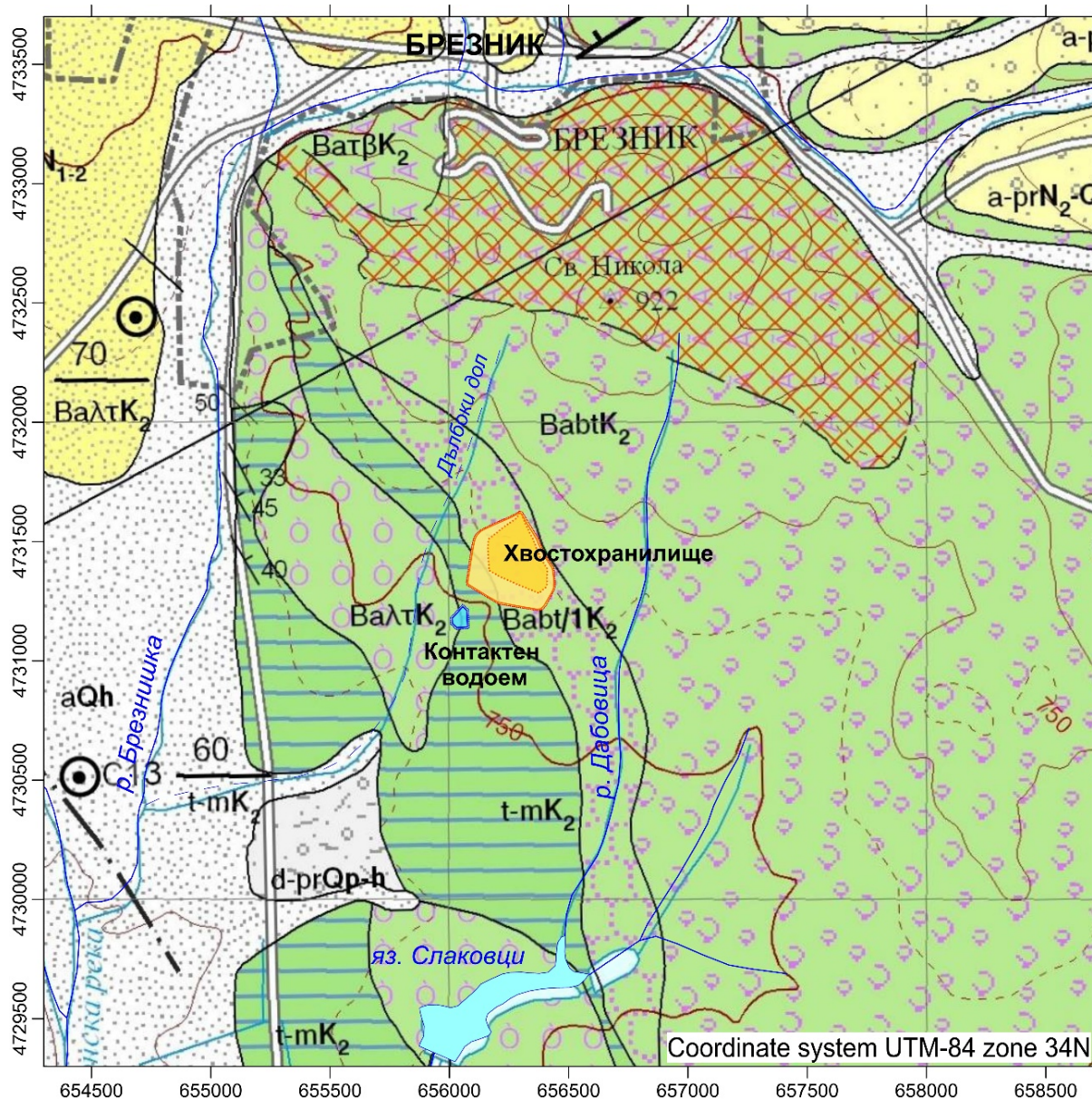
Туфитно-мергелна задруга ($t-mK_2$). Разкрива като широка до 500–600 m ивица между гр. Брезник и с. Сопица. Представена е от туфи, туфити, мергели и глинести варовици, като за основа ѝ служат скалите на Делянския вулкански комплекс. Покрива се с рязка литоложка граница от пирокластичната задруга на Бабския вулкански комплекс. Процепва се от базичния дайков сноп и едропорфирните латити и трахити на същия комплекс. Върху скалите от състава на *туфитно-мергелната задруга* ще се разполага по-голямата част на контактния водоем и югозападните части на хвостохранилището.

Пирокластична задруга ($BabtK_2$). В участъка на концесионната площ по-голямо площно разпространение комплекса има между град Брезник и селата Расник и Сопица. Материалите на задругата лежат с вертикален и латерален преход върху туфитно-мергелната задруга. Процепват се от латитите и трахитите на Бабския комплекс. В основата на разреза се разкрива тънкослойна алтернация на туфи с редки прослойки от варовито-мергелни седименти, отделени като пачка на псамито-алевритовите туфи. Следват агломератовите туфи, които изграждат горната част от задругата. Всред пирокластичните скали на различни нива се установяват базични лави.

Пачка на псамито-алевритовите туфи ($Babt/1K_2$). Установява се в основата на пирокластичната задруга и се припокрива с разпространението на задруга на псамито-алевритовите туфи. На терена се разкрива като две ивици със СЗ-ЮИ посока. Основна литоложка разновидност са витрокристалокастичните, литокластичните, пепелните и алевритови туфи. На места се наблюдават тънки варовито-мергелни пропластия. Агломератовите туфи са най-характерните скали на тази единица. Те са изградени от вулкански късове, плувачи в масивен лапилен до пепелен матрикс. Базичните андезити образуват разливи и потоци. Те са съгласни на пирокластитите и с аналогичен състав като този на късовете, от които трудно се отличават. *Псамитно-алевритовите туфи* доминират в геоложкия разрез в по-голямата част под основата на хвостохранилището.

Едропорфирни латити и трахити ($ValtK_2$). Изграждат линейно удължени тела (средна ширина до 500 m) със северозапад-югоизточна посока. Разкриват се северно от с. Парамун, при с. Неделково, южно от Брезник до към яз. Слаковци. Процепват скалите на пирокластичната задруга на Бабския вулкански комплекс. Срещат се и в долните части на мергелно-туфитната задруга. Представени са основно от лавови разливи, послойни и секущи тела. Изследваният разрез е изграден главно от трахиандезити. В горната част на разреза тези скали са изветрели, вторично променени, а на места разложени до глини. *Едропорфирните латити и трахити* изграждат геоложката основа в най-западните периферни части на контактния водоем и хвостохранилището.

Трахибазалти и шошонити ($Val\beta K_2$). Базичните вулканити се установяват на юг от Брезник (вр. Св. Никола). Процепват пирокластичната задруга на комплекса.



Фиг. 3. Геоложка карта в района на гр. Брезник.
(по Геоложката карта на България М : 50000)

Почти повсеместно горнокредните комплекси са покрити от кватернерни делувиални наслаги - глини, пясъчливи глини и глини с чакъл, прослоени от тънки пясъчливи слоеве. Общата дебелина им варира от 1 до 10 m и повече.

Палеоген

Пъстра моласоидна задруга ($mdOl_{1-2}$). Изградена е от дребнокъсови конгломерати, пясъчници и алевролити, на места с прослойки и пачки от тънкослойни пясъчливи мергели. В долната част на разреза преобладават пъстроцветни гравелити и едрозърнести пясъчници, а в горната част полимиктови алевро-аргилити. Долната граница е несъгласна, размивна с горнокредните скали. Горната граница е рязък литоложки преход към аргилитно-мергелната задруга или размивна с неогенската пясъчниково-глинеста задруга.

Пясъчниково-глинеста задруга ($s-cN_{1-2}$). Включва седиментите, запълващи Граовското понижение. Долната граница е неравна, размивна с донеогенските скали. Покрита е от плиоцен-плейстоценски и кватернерни наслаги. В основата на задругата са установени дребнокъсови конгломерати с дебелина до 15 m. Основният литоложки фон се определя от пъстри глини, съдържащи растителни останки и листни отпечатъци, незакономерно прехождани в пясъчливи глини, прослоени от полимиктови пясъчници и конгломерати.

Неоген-Кватернер

Алувиално-пролувиални наслаги ($a-prN_2-Q$). Тези наслаги имат неравни, размивни граници с неогенските седименти и покриващите ги плейстоценски наслаги. Представени са от брекчоконгломерати с пясъчливо-гравийен матрикс. Късовете са от пирокластични и вулкански скали от Бабския комплекс. Дебелината им при с. Бабица достига до 40–50 m.

Кватернер

Делувиално-пролувиални наслаги ($d-prQp-h$). Разкриват се между селата Конска и Стрин дол и в района на гр. Брезник. Западно от с. Вискяр и на северозапад от с. Слаковци изграждат полегатите склонове. Изградени са от чакъли и по-рядко валуни. Матриксът е пясъчлив, глинесто-пясъчлив или глинест. Дебелината им достига до 10 m.

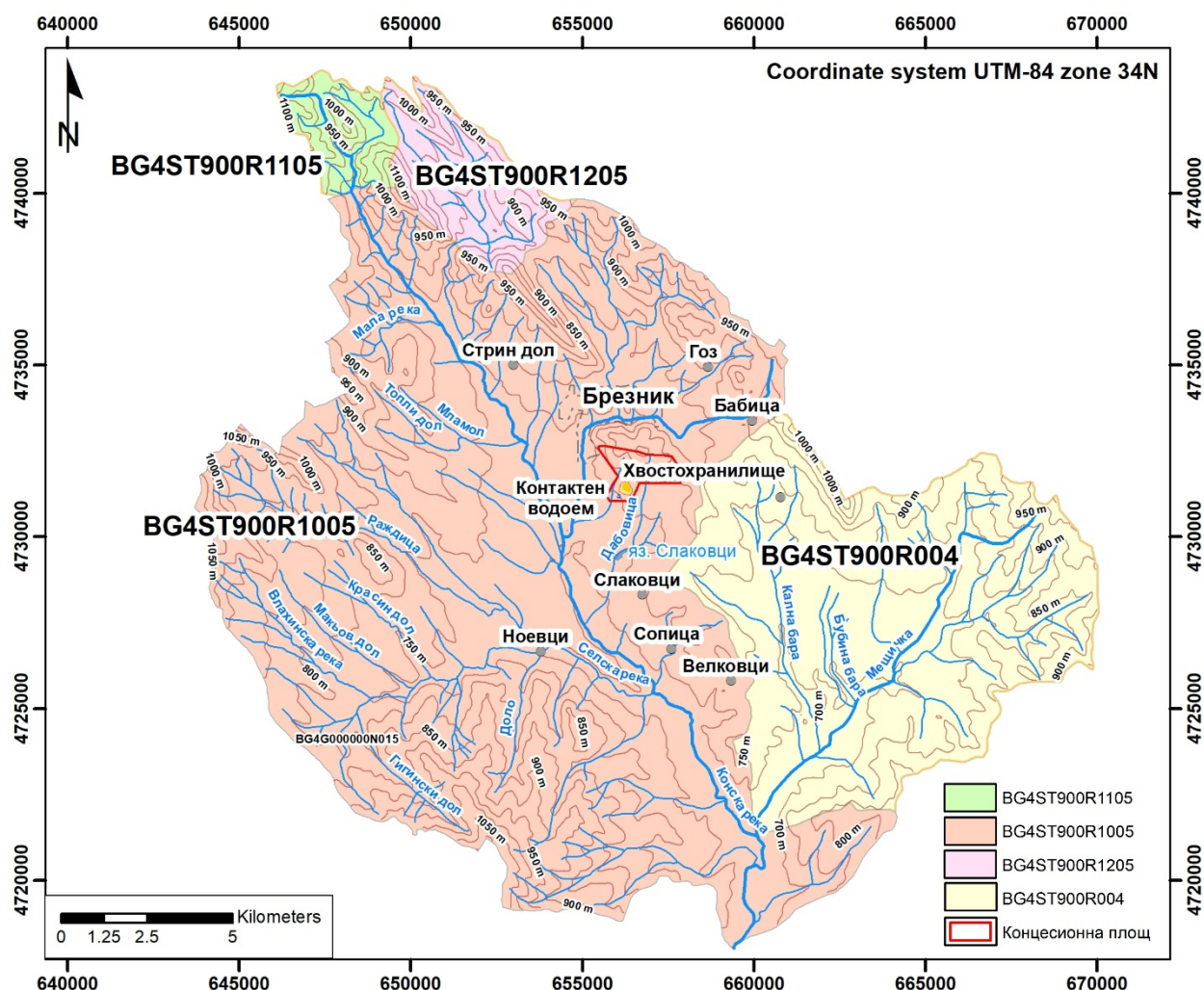
Алувиални наслаги руслови и на заливните тераси (aQh). Алувиалните наслаги изграждат заливните тераси на реките Конска, Кална бара и др. Изградени са от разноразмерни пясъци и глинести пясъци с тънки прослойки от нечисти, пясъчливи глини. Сред тях се наблюдават неиздържани прослойки и лещи от чакъли. Дебелината на алувиалните наслаги варира от 1 m до няколко метра в долините на по-големите реки. В долината на р. Конска, дебелината е от 10 m, като на юг се увеличава и достига до 25 m.

1.5. Повърхностни води

Изследваният район попада във водосборния басейн на р. Конска. Същата води началото си от връх Китка, а се влива в р. Струма. Реката събира водата от равнината Граово и ограждащите я планини Завалска, Вискяр, Любаш и Черна гора. По-важните ѝ притоци са р. Брезнишка (Турска), р. Мещичка и р. Ноевска. Оттокът е неравномерен, но целогодишен. Максимумът е в късната пролет, а минимумът – в края на лятото. Модулът на оттока е между 15 и 20 L/s.km².

Във водосборния басейн на р. Конска са отделени четири повърхностни водни тела, чиито граници са представени на Фиг. 4. Концесионната площ на находище „Милин камък“ и площадките на хвостохранилището и контактния водоем попадат изцяло в повърхностно водно тяло Конска ST1005 с код BG4ST900R1005. По-конкретно обектът на настоящото проучване се разполага във водосбора на р. Брезнишка, а на изток в голяма близост от него преминава р. Дабовица, която е ляв приток на р. Конска – Фиг. 5.

Кратка информация за повърхностните водни тела от водосбора на р. Конска е представена в табл. 2.

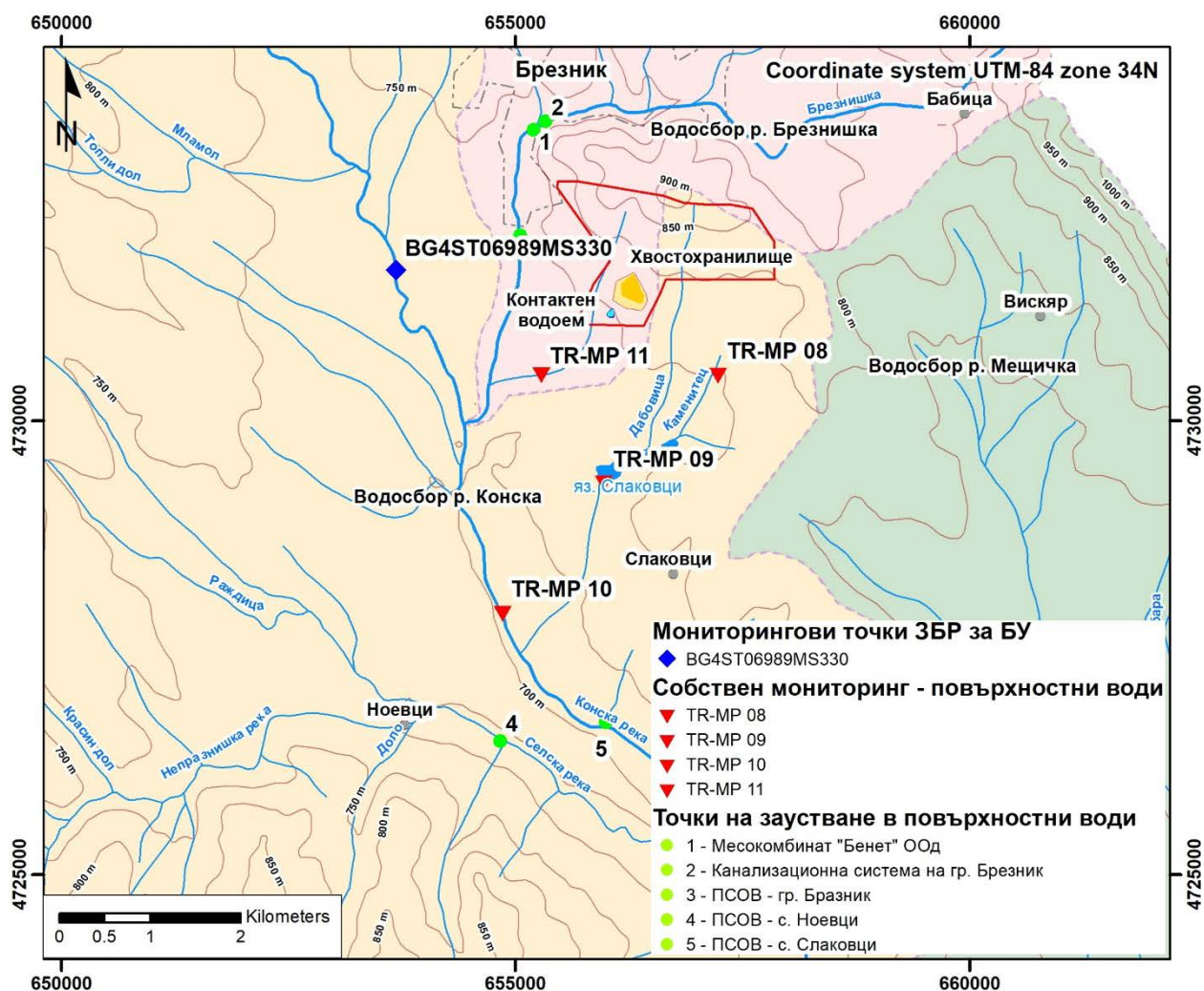


Фиг. 4. Речна мрежа, водосбори и повърхностни водни тела.
(по данни на БД ЗБР)

Таблица 2. Характеристики на повърхностните водни тела във водосбора на р. Конска

Код на повърхностното водно тяло	BG4ST900R004	BG4ST900R1005	BG4ST900R1105	BG4ST900R1205
Име на повърхностното водно тяло	Мещичка ST004	Конска ST1005	Конска ST1105	Конска ST1205
Категория на повърхностното водно тяло	река	река	река	река
Тип река	полупланинска	полупланинска	полупланинска	полупланинска
Дължина на реката, km	13.91	39.46	4.28	6.69
Водосборна площ, km ²	92.35	255.25	8.44	15.81
Географско описание на повърхностното водно тяло	р. Мещичка от изворите до вливане в р. Конска	р. Конска (от кота 840 m) с десния си приток р. Селска до вливане в р. Струма	р. Конска от изворите до кота 840 m	р. Конска от изворите до кота 130 m
Поречие	Струма	Струма	Струма	Струма

Забележка: По данни на БД ЗБР.



Фиг. 5. Водосборни области и мониторингови пунктове в района на изследвания обект

За контролиране на качествата на повърхностните води на територията на ПВТ Конска ST1005 с код BG4ST900R1005 са организирани пет мониторингови пункта, в това число един пункт за контролен мониторинг на БД ЗБР и четири пункта за собствен мониторинг на "БРЕЗНИК МИНЕРАЛС" ЕООД (Фиг. 5). На същата фигура са представени и разрешените от БД ЗБР точки на зауставане на отпадъчни води в речната мрежа.

Данните от мониторинга показват, че повърхностните води в района са незамърсени.

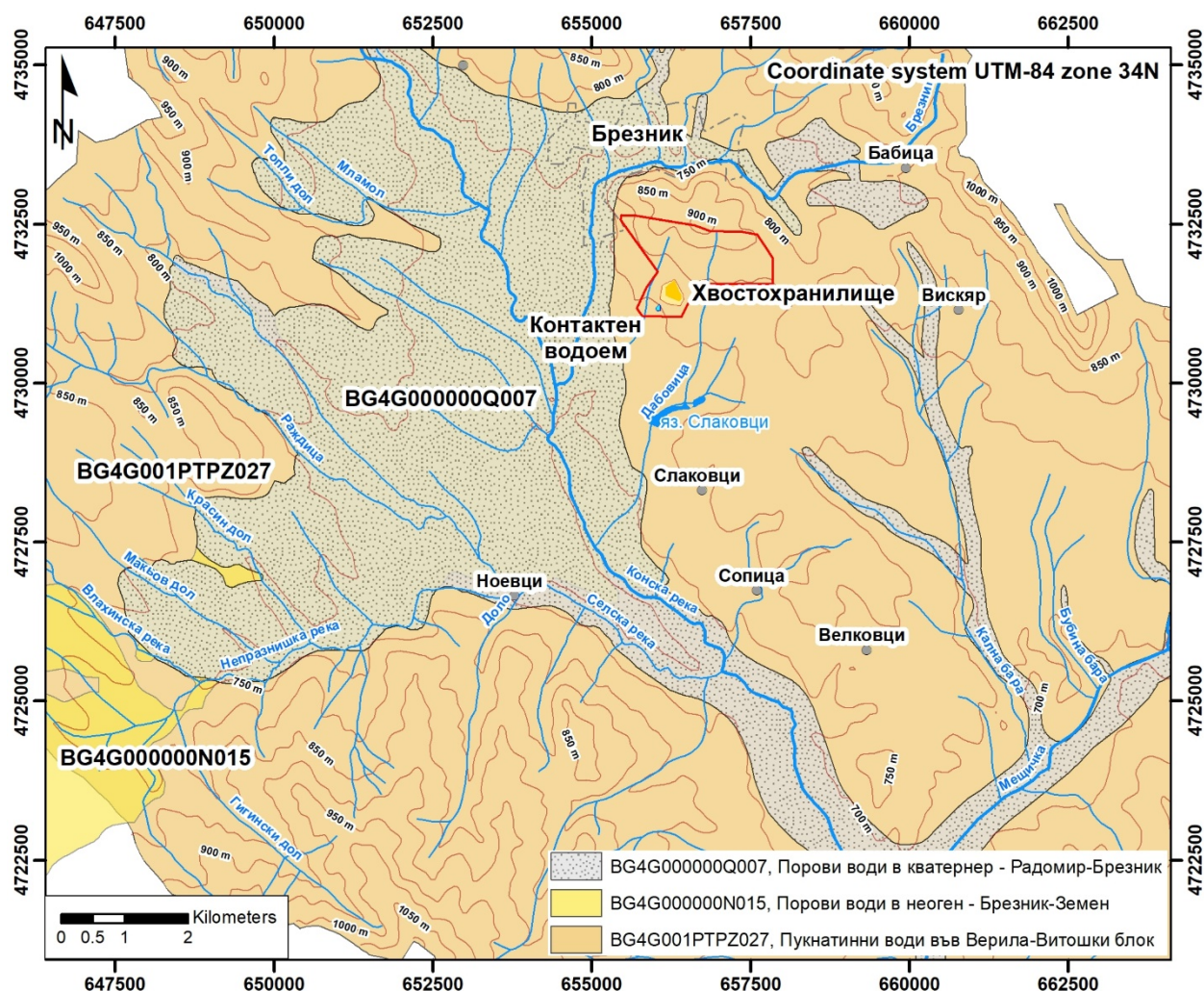
1.6. Подземни води

В регионален план за района са характерни три типа подземни води - пукнатинен, пукнатинно-поров и поров. Първите два типа се срещат в геоложката основа на проучваната площадка за хвостохранилище, както и на цялата територия на концесионната площ.

Пукнатинните и пукнатинно-поровите води са формирани главно в скалните комплекси на горната креда и покриващите ги делувиялни наслаги. Свързани са основно с тектонската и изветрителната напуканост на масива. Характеризират се с относително ниска водообилност и водопроницаемост, коефициентът на филтрация обикновено е в диапазона 0,001-0,1 m/d, рядко извън тези граници. Подхранването е от инфилтрация на валежни води, а дренирането е чрез малобедитни извори, най-често с дебит до 0,2-0,3 L/s. Някои сондажи, прокарани по време на проучването на рудното находище, са пресекли тектонски зони на дълбочина 150-200 m, в които пукнатинно-жилните води са напорни и на самоизлив, но с малък дебит – не по-голям от 0,35 L/s.

Поровите води са акумулирани в несвързаните алувиални и алувиално-пролувиални отложения, които изграждат терасите на р. Конска и нейните притоци. В основата им лежат чакъли с неголяма мощност, покрити отгоре с пясъчливо-глинести материали. Водното ниво е обикновено между 2 и 4 m под терена. Водообилността е висока. Проводимостта на пласта между реките Брезнишка и Конска надхвърля $200 \text{ m}^2/\text{d}$. В ниските тераси на реките тя е най-често между 50 и $120 \text{ m}^2/\text{d}$.

В плана за управление на речните басейни (ПУРБ) на БД ЗБР в района на гр. Брезник са обособени три подземни водни тела: Порови води в кватернер – Радомир-Брезник с код BG4G000000Q007; Порови води в неоген – Брезник-Земен с код BG4G000000N015; Пукнатинни води във Верила-Витошки блок с код BG4G001PtPz027. Техните граници са илюстрирани на Фиг. 6.



Фиг. 6. Подземни водни тела в района на гр. Брезник.
(по данни на БД ЗБР)

Порови води в кватернер – Радомир-Брезник с код BG4G000000Q007. Обхваща Радомирския и Брезнишкия басейни. Разполага се на площ 350 km^2 и е част от Трънския мегаантиклинорий. Изградено е от кватернерни и неогенски (плиоценски) чакълесто-пясъчливи и глинести наслаги с обща дебелина 10-12 m. В горната част на разреза е установен глинесто-пясъчен слой с дебелина между 1 и 4 m. Под него заляга чакълесто-пясъчен пласт, неравномерно прослоен от глини. В алувиалните наслаги на р. Струма е

формиран подземен поток, хидравлично свързан с речното течение. При средни и ниски водни стоежи подземните води се дренират в р. Струма, а при високи стоежи реката ги подхранва. Средният напорен градиент на потока е 0,003. По обобщени данни в ПВТ BG4G000000Q007 преобладава поровият тип подземни води, а коефициентът на филтрация има стойности около 140 m/d. Проводимостта варира между 400-600 m/d. Площта на зоната на подхранване е 338 km². Средният модул на подземния отток е 3,0 L/s/km². Основни източници за подхранване са пукнатинните води от скалния масив на Голо Бърдо, р. Струма и инфилтриралите се валежни и поливни води. ПВТ BG4G000000Q007 е в пряка хидравлична връзка с повърхностните водни тела: р. Струма от яз. „Пчелина“ до вливането на р. Треклянска с код BG4ST900R012; Язовир „Пчелина“ с код BG4ST900L1010; р. Струма от вливането на р. Конска до яз. „Пчелина“ с код BG4ST900R006 и р. Струма от яз. „Пчелина“ до вливането в р. Конска с код BG4ST900R003.

Порови води в неоген – Брезник-Земен с код BG4G000000N015. Обхваща неогенските седименти в района на Брезник-Земен и е с площ 105 km². Представено е от алтернация на глинести пясъчници, пясъци и пясъчливи глини, въглища, въглищни шисти и алевролити с обща дебелина до 100 m. Като цяло неогенът е слабо водоносен. Средната проводимост е 50 m²/d, а коефициентът на филтрация – около 3 m/d. Средният модул на подземния отток е 0,5-1,0 L/s/km². Подземните води са безнапорни, имат пряка връзка с реките и повърхностните водоеми.

Пукнатинни води във Верила-Витошки блок с код BG4G001PtPz027. Площта на водното тяло е 1282 km². Дебелината на водовместващите слоеве достига до 700-1000 m. Представени са от амфиболитови гнайси, амфиболитови шисти, зелени шисти, гранитогнайси, биотитови гнайси, мигматити и амфиболити, както и други скални формации, изграждащи донеогенската подложка. В района на гр. Брезник и в частност на територията на хвостохранилището водовместващи са скалите от състава на горнокредните вулкански и вулканоседиментни комплекси – трахиандезити, туфи, туфити, мергели, агломератови туфи, туфобрекчи, алевролити и др. Хидрогеоложките формации в това водно тяло са слабо водоносни и с ниска пропускливост. Средната проводимост е под 50 m²/d, коефициентът на филтрация – до 2 m/d, а модулът на подземния отток – около 0,5 L/s/km². Подхранването на тялото е предимно от валежите. Връзката между повърхностни и подземни води е затруднена.

Количественото и химично състояние на трите подземни водни тела – BG4G000000Q007, BG4G000000N015 и BG4G001PtPz027, както и обобщени данни за техните ресурси са представени Табл. 3.

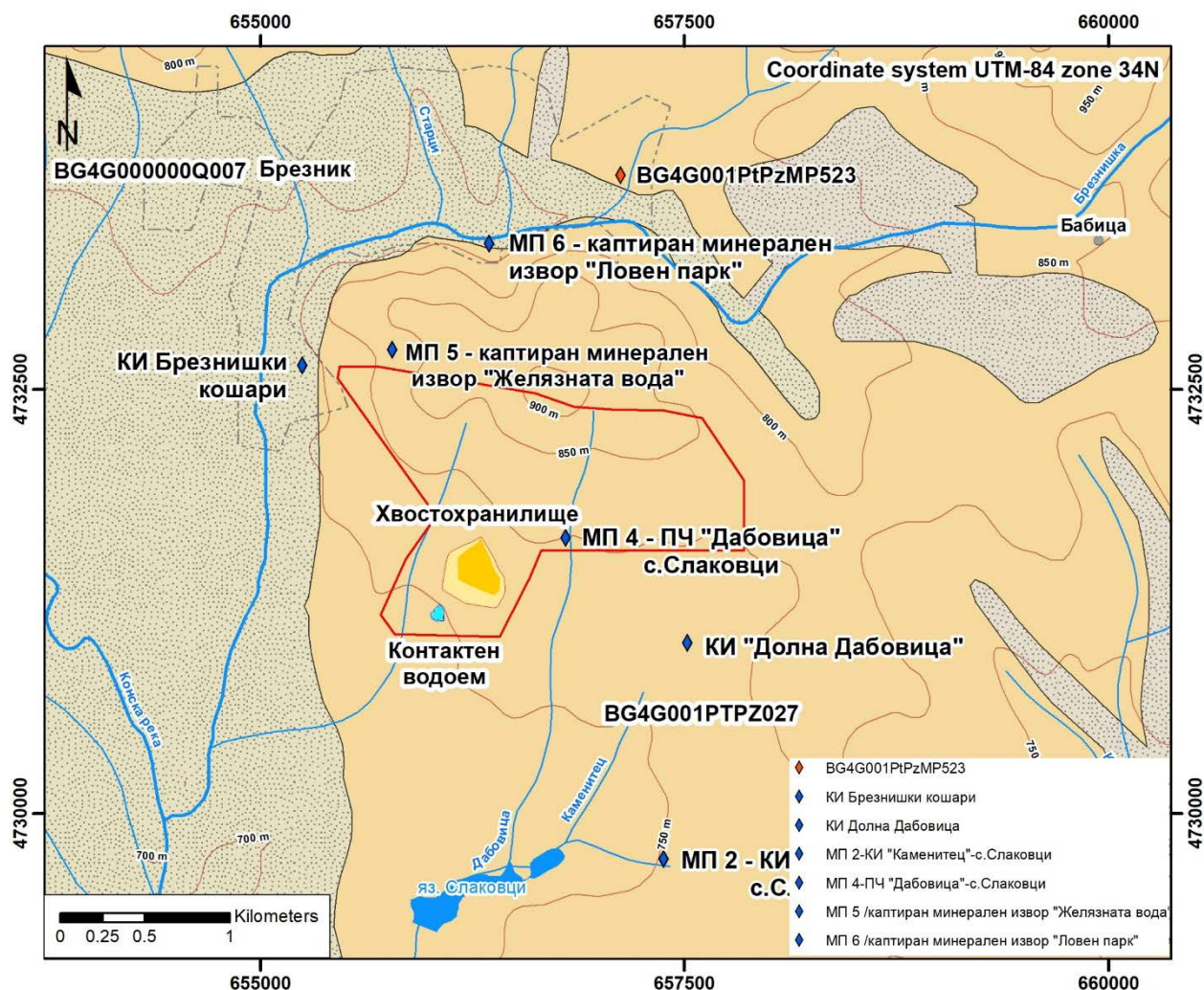
Таблица 3. Характеристики на подземните водни тела в района на Брезник

Код на подземното водно тяло	BG4G000000Q007	BG4G000000N015	BG4G001PtPz027
Наименование на водно тяло	Порови води в кватернер - Радомир-Брезник	Порови води в неоген - Брезник-Земен	Пукнатинни води във Верила-Витошки блок
Тип на ПВТ	ПВТ в алувиалните отложения на реките	ПВТ в грабенвидни депресии	ПВТ с пукнатинни води
Естествени ресурси, l/s	219.0	19.0	207.0
Необходими количества за екосистемите, l/s	51.6	0.0	30.0
Разполагаеми ресурси, l/s	167.4	19.0	177.0
Оценка на количественото състояние на ПВТ	добро	добро	добро
Оценка на химичното състояние на ПВТ	добро	добро	добро
Общо състояние на ПВТ	добро	добро	добро

Забележка: По данни на БД ЗБР.

По проект хвостохранилището се разполага изцяло в границите на подземно водно тяло Пукнатинни води във Верила-Витошки блок с код BG4G001PtPz027. Контролен мониторинг на химичното състояние върху това водно тяло се извършва от БД ЗБР в

специално обособения воден пункт BG4G001PtPzMP523. Собствен мониторинг върху подземните води в района на концесионната площ се осъществява от “БРЕЗНИК МИНЕРАЛС” ЕООД. Разположението на мониторинговите пунктове за контролен и собствен мониторинг в района са илюстрирани на Фиг. 7.



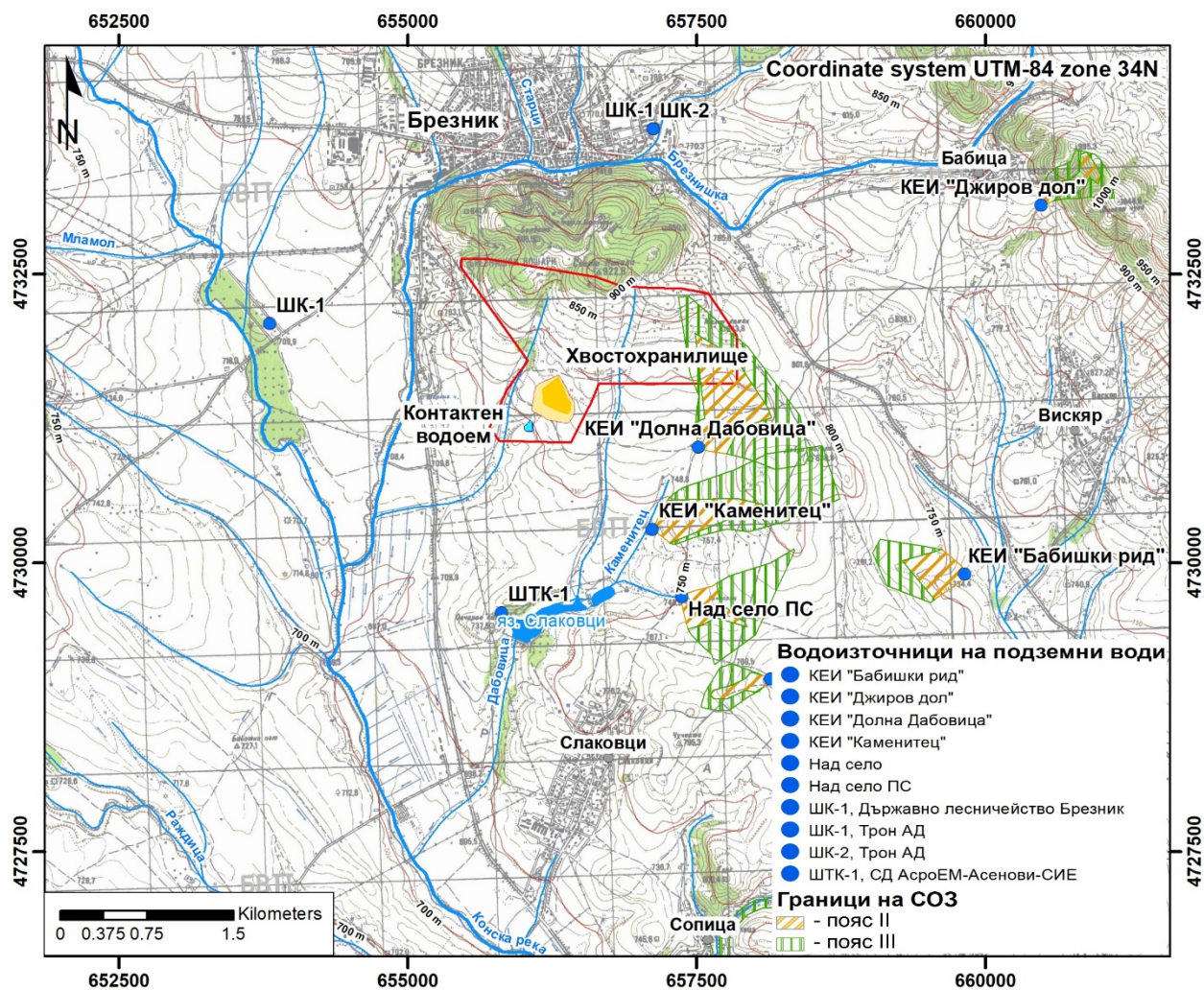
Фиг. 7. Мониторингови пунктове за подземни води
(по данни на БД ЗБР)

По данни от БД ЗБР резултатите от водения до момента мониторинг показват, че подземните води в района на гр. Брезник, концесионната площ и отредената площадка за хвостохранилище са незамърсени.

1.7. Източници за питейно водоснабдяване. Санитарно-охранителни зони.

В района на проучвателната площадка на хвостохранилището в регистрите на БД ЗБР фигурират 10 водоизточника за добив на подземни води – Табл. 4 и Фиг. 8. Шест от тях са с учредени санитарно-охранителни зони (СОЗ), съгласно действащата законова и нормативна база.

Важно е да се отбележи, че площадките на хвостохранилището и контактния водоем по проект „Брезник“, находище „Милян камък“ не попадат в нито една от съществуващите санитарно-охранителни зони (СОЗ) – вж. Фиг. 8.



Фиг. 8. Водоизточници за добив на подземни води в района на гр. Брезник.
Граници на санитарно-охранителните зони (СОЗ)
(по данни на БД ЗБР)

Таблица 4. Данни за водоизточниците в района на изследвания обект

Водоизточник	Населено място	Собственик	Дебит, L/s
КЕИ "Бабишки рид"	с. Бабица	ВиК Перник	0,300
КЕИ "Джиров дол"	с. Вискарь	ВиК Перник	0,050
КЕИ "Долна Дабовица"	с. Слаковци	ВиК Перник	0,001
КЕИ "Каменитец"	с. Слаковци	ВиК Перник	0,050
Дренаж "ПС - Над село"	с. Слаковци	ВиК Перник	0,100
Дренаж "Над село - Перчовица"	с. Слаковци	ВиК Перник	0,020
Шахов кладенец ШК-1	гр. Брезник	Държавно лесничество Брезник	0,030
Шахов кладенец ШК-1	гр. Брезник	Торн АД	0,570
Шахов кладенец ШК-2	гр. Брезник	Торн АД	0,540
Шахов кладенец ШТК-1	с. Слаковци	СД Агро-ЕМ-Асенов-СИЕ	

Забележка: По данни на БД ЗБР и ВиК Перник

1.8. Технологични условия

Приетата нова технология за строителство и експлоатацията на системата за управление на отпадъците от преработването на полезните изкопаеми от находище „Милин камък“, гр. Брезник използва един ефективен и с много нисък екологичен отпечатък метод за утилизация. При този метод след предварителна обработка по схема, включваща смилане, обезводняване чрез сгъстяване и филтриране с преси, преработените отпадъци под формата на филтриран кек се депонират в насипен тип хвостохранилище, където се разстилат с булдозери и допълнително уплътняват с валежи. Очевидното предимство на насипния тип пред наливния тип хвостохранилище е много по-ниското количество на възможни течни емисии извън тялото на хвостохранилището при равни други условия.

Съоръженията от проектната система за управление на отпадъците от преработката на полезните изкопаеми от находище „Милин камък“, които могат да се разглеждат като потенциални източници на замърсяване са две – хвостохранилището и контактния водоем (Фиг. 1 и Фиг. 12). Основните технологични параметри при тяхното изграждане, експлоатация и рекултивиране са следните:

1.8.1. Хвостохранилище

Хвостохранилището е насипен тип (сухо хвостохранилище) с общ капацитет $1,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. То ще бъде изградено в рамките на концесионната площ, като в края на експлоатационния период ще заема около 110 dka. Отпадъците ще се полагат и уплътняват така, че да се отводняват по естествен начин.

Филтрираният отпадък (кек) със съдържание на влага около 15-20 % ще се транспортира до сухото хвостохранилище, където ще се разстила с булдозери на пластове като се осигури възможност за изсушаване чрез дрениране и/или изпарение преди уплътняване. В основата на насипа първите 2-3 пласта ще са с дебелина 0,5 m и степен на уплътняване $K \geq 0,90$, а положените над тях пластове – с дебелина 0,2-0,3 m и степен на уплътняване $K \geq 0,97-1,00$. Уплътнението ще се извърши с вибрационен шиповиден валеж. Целевата плътност на насипания отпадък е около $1,5 \text{ t/m}^3$.

При изграждане на насипното тяло ще се оформят междинни берми през 8 m, с ширина 5 m и напречен наклон за отводняване към ската, с което се намалява и възможността за ерозия. Откосът между две берми ще е с наклон 1:2.1, а средният откос 1:3. За ефективно отвеждане на дъждовните води горната повърхност на пластовете ще е наклонена към ската с около 2-3%. Височина на хвостохранилището от кота корона до кота пета въздушен откос в края на експлоатацията ще е 34.10 m.

По данни от гранулометричните анализи 80% от смления краен отпадък е с размер около 0,045 mm, а 10% – с размер 0,00165 mm. По данни от одометричните (компресионните) тестове коефициентът на филтрация на кека варира в диапазона от $8,5 \cdot 10^{-6}$ до $2,50 \cdot 10^{-3} \text{ m/d}$, средно около $3,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/d}$ при консолидация на материала между 0,4 и 21,8 %.

За ограничаване безконтролното изтичане на течни емисии от хвостохранилището под неговото дъно се планира да се изградят две инженерни противифилтрационни бариери:

- Силно уплътнен (валиран) пласт глина в най-горната част на геоложката основа с дебелина около 0,5 m.
- Долен изолиращ екран (ДИЕ), който се полага върху силно уплътнения пласт глина и отдолу на горе включва следните основни елементи:
 - ~ Хидроизолационна двустранно структурирана геомембрана (HDPE) с дебелина 2 mm, UV устойчива и напълно водонепропусклива.
 - ~ Нетъкан геотекстил с площна маса 400 g/m^2 .

- ~ Площен дренаж съставен от скален материал – трошен камък (без наличие на варовик) фракция 4-20 mm, включващ система от тръбни дренажни колектори и изводи, вкопани в оформени траншеи по дъното на хвостохранилището.
- ~ Дренажен термослепен нетъкан геотекстил TYPAR SF 56, който подстила депонираните отпадъци.

Хвостохранилището ще се експлоатира в продължение на осем години. Ще се изгражда на два етапа, всеки с продължителност четири години. По време на Етап 1 филтрираният отпадък ще се депонира в западната част на хвостохранилището до кота 779.00 m – Фиг. 9. След това, през първите две години на Етап 2 отпадъкът ще се насипва в източната част до коти 778,76 – 779,06 m – Фиг. 10. Впоследствие, до края на Етап 2 депонирането ще продължи върху насипаните до момента отпадъци до кота 784,84 m – Фиг. 11.

Планираните за усвояване през различните етапи и подетапи територии са илюстрирани на Фиг. 12. На същата фигура е представен и релефът на хвостохранилището в края на неговата експлоатация.

1.8.2. Контактен водоем

Контактният водоем ще се изгради в непосредствена близост на югозапад и по-ниска кота от хвостохранилището. Той ще бъде вкопан в терена, с наклон на откоса 1:2 и оградна берма на условна кота 746,00 m и ширина 5,00 m. Дъното на водоема ще е на кота 742,5 m, с наклон 0.5% и площ около 4 dka. Общата му вместимост ще е $1,4 \cdot 10^4 \text{ m}^3$. Той е оразмерен да задържа максималния обем за съхранение, обезпечаващ нормалната експлоатация на съоръженията. В него ще се приемат водите от дренажната система за инфилтрат и от канавките, отвеждащи условно замърсените води. Събраните във водоема води се използват като оборотни води в производствения цикъл на фабриката.

С цел недопускане възможно изтичане на води от контактния водоем под неговото дъно ще се изгради защитна противифилтрационна система, състояща се от:

- Силно уплътнен (валиран) пласт глини в най-горната част на геоложката основа с дебелина около 0,5 m;
- Хидроизолационна едностранно структурирана геомембрана (HDPE) с дебелина 2 mm, с UV защита и практически напълно водонепропусклива.

1.8.3. Закриване на съоръженията и рекултивация

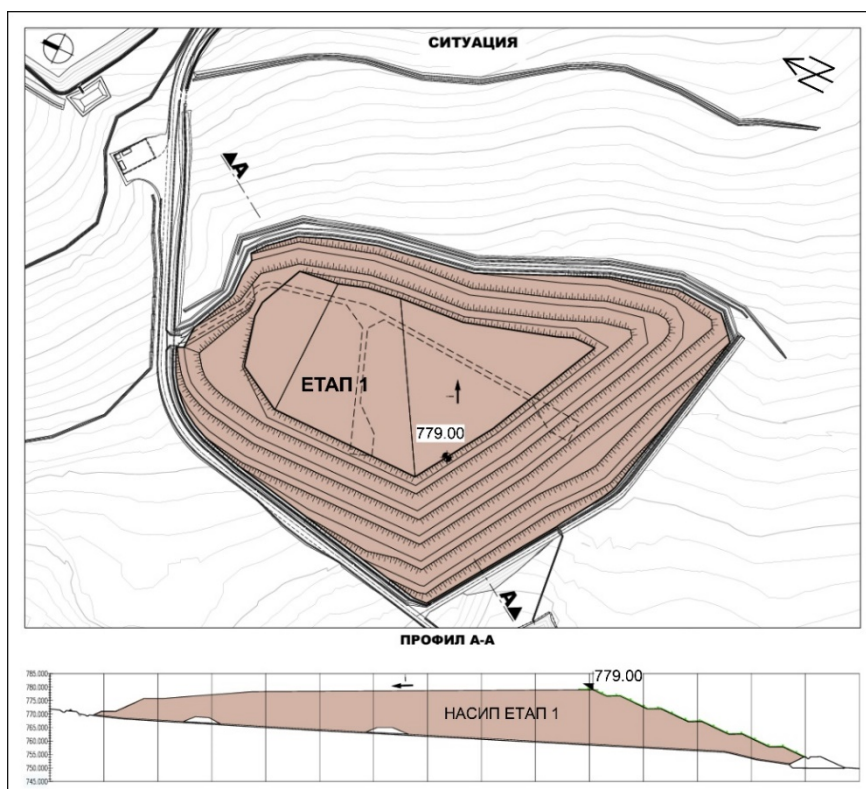
След приключване на добива, хвостохранилището ще има височина около 34 m и ще съдържа приблизително $1,2 \cdot 10^6 \text{ t}$ филтриран отпадък (кек). За ликвидацията и рекултивацията на обекта ще бъде изготвен проект съгласно изискванията на Закона за подземните богатства.

По време на експлоатацията на хвостохранилището при капацитета на даден обем ще се извършва техническа и биологична рекултивация на откосите и/или площта от насипа, в която се осъществява контакт между насипите на двата експлоатационни етапа при спазване на проектните очертания на насипното тяло. Техническата рекултивация включва преоткосиране на насипа съгласно проектните коти и полагане на горен изолиращ екран (ГИЕ), който представлява един пласт с дебелина 0,30 m от незамърсени почви с повишено биологично съдържание. Площта, подлежаща на техническа рекултивация при изграждане на Етап I, е в размер на 44391 m^2 , в която попада и площта на контакт между насипите на двата етапа възлиза на 15121 m^2 . Върху контактната площ ще се направи т.нар. „временна“ рекултивация като насипа се третира с полимерен почвен стабилизатор, с който ще се предотврати ветровата и водна ерозия по откоса. По останалата площ от 29270 m^2 , както и върху подлежащата на техническа рекултивация при Етап II от 18254 m^2 , ще се направи преоткосиране на изградените до проектните коти насипи и ще се положи горният изолиращ екран. Биологичната рекултивация ще се изпълни чрез затревяване на

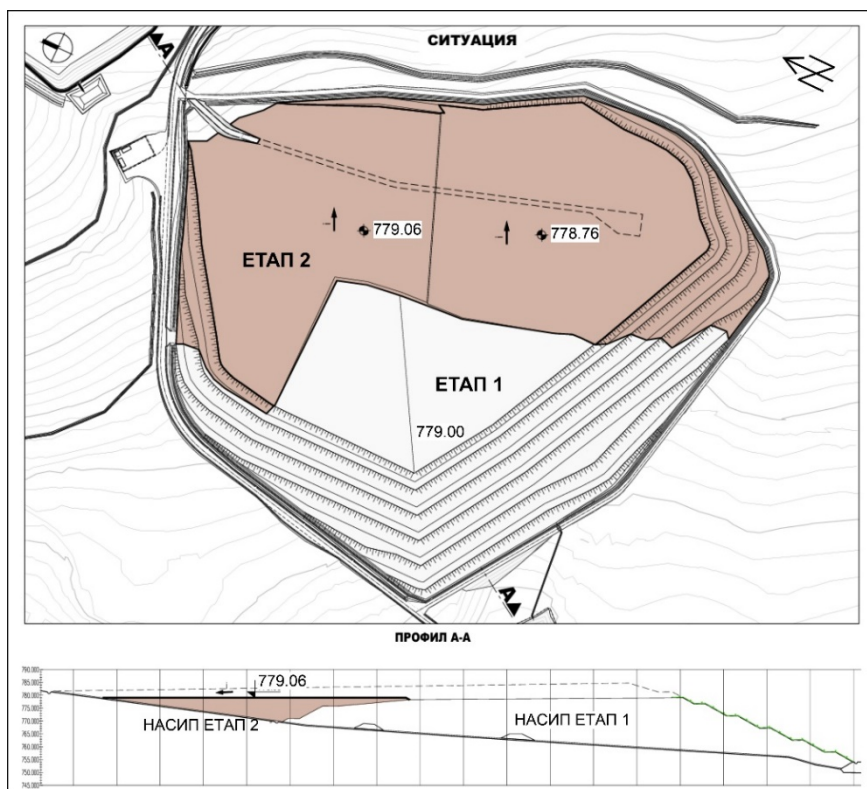
въздушните откоси поетапно, с нарастване във височина на насипите. Общата площ, подлежаща на затревяване е в размер на 62645 m² върху насип от незамърсени почви с повишено биологично съдържание, с наклон на откосите 1:2.1 и наклон по бермите 1%. За отводняване на рекултивираните площи в основата на откоса се изграждат облицовани канавки с наклон, следващ наклона на бермите. Водите от канавките по съществуващата инфраструктура се отвеждат в контактния водоем.

След приключване на експлоатацията на хвостохранилището техническата рекултивация започва с демонтирани всички съоръжения, които не са свързани с опазване на околната среда и с бъдещото функционално предназначение на терена. На демонтаж не подлежат наблюдателните стълбове, контролните марки, пиезометрите, отводнителните канавки и дренажите. След това депонираните отпадъци се преоформят до постигане на желаната окончателна геометрия. Следващата стъпка е изграждането на горен изолиращ екран (ГИЕ) от почвен пласт с дебелина 0,3 m и биологична рекултивация чрез затревяване с подходящи растителни видове. Отвеждането на дъждовните и повърхностните води от района на рекултивираното хвостохранилище ще се осъществява със система от облицовани канавки.

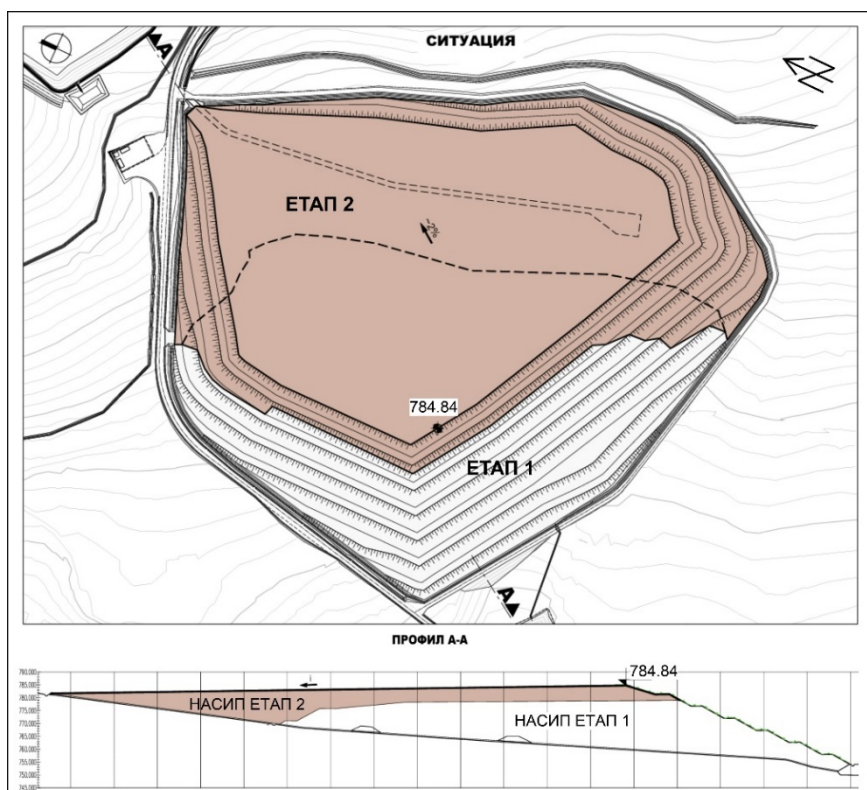
В началния период след закриване на добива остатъчният отток от площния дренаж под хвостохранилището ще се управлява чрез увеличено изпарение и чрез система за обратно изпомпване, свързана с водоема за съхранение на инфилтрат и дъждовни води след обилни валежи. Качеството и дебита на дренираните води ще се проследява веднъж на тримесечие. Почвения слой и растителната покривка ще служат като покритие за евапотранспирация, което ограничава инфилтрацията от валежи (дъжд или снеготопене). Във водоема ще се съхраняват единствено повърхностен отток след по-интензивни валежи или снеготопене.



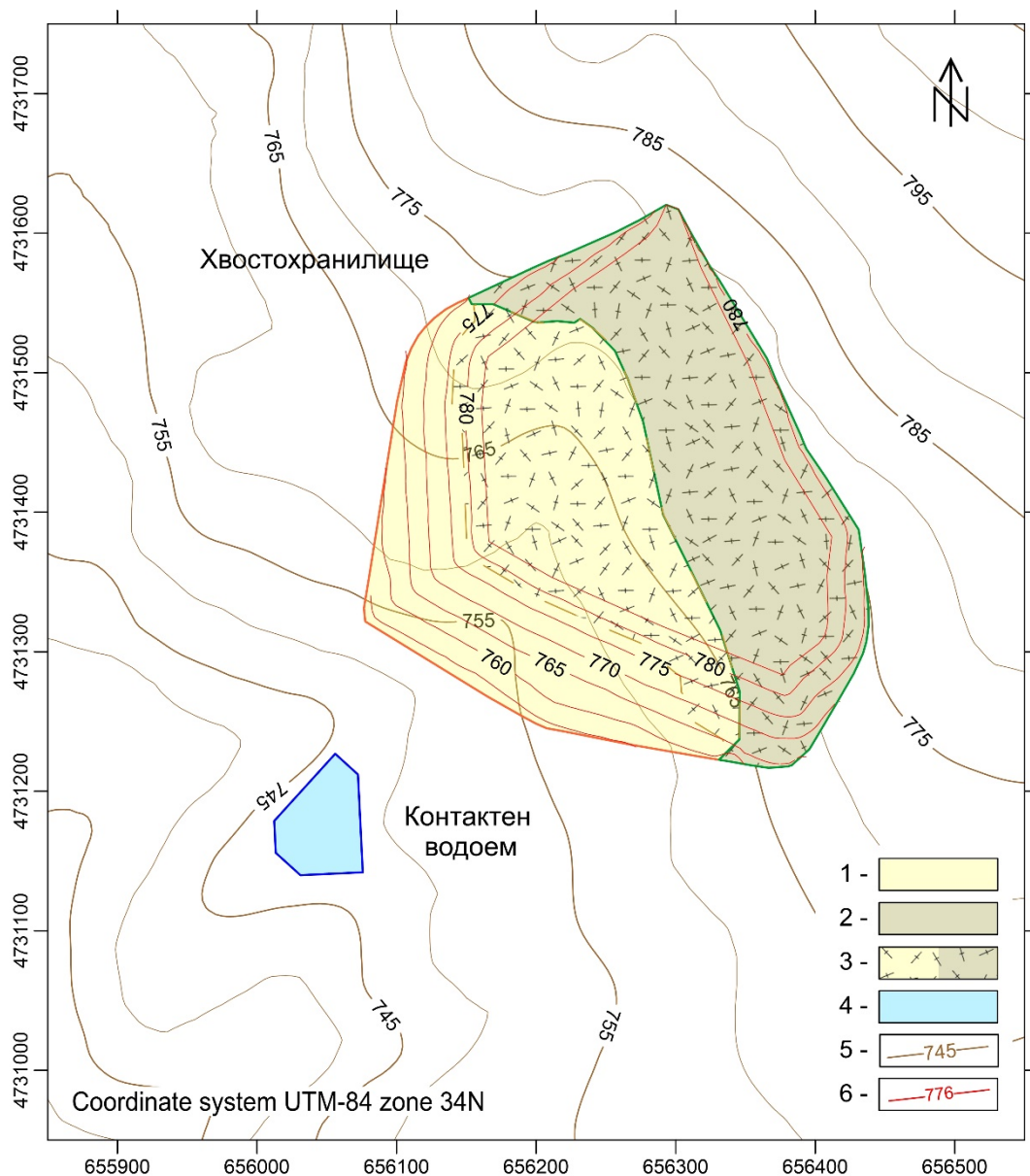
Фиг. 9. Пространствени граници на депонирания отпадък в края на Етап 1.
Експлоатационен период – 4 години.



Фиг. 10. Пространствени граници на депонирия отпадък в средата на Етап 2.
Експлоатационен период – 2 години.



Фиг. 11. Пространствени граници на депонирия отпадък в края на Етап 2.
Експлоатационен период – 2 години.



Фиг. 12. Площи за депониране на хвоста през различните строителни етапи. Релеф на хвостохранилището след закриване на добива.

Условни означения: 1 – Площ през Етап 1 (4 години); 2 – Площ през първата половина на Етап 2 (2 години); 3 – Площ през втората половина на Етап 2 (2 години); 4 – Площ на контактния водоем; 5 – Релеф на земната повърхност; 6 – Релеф на хвостохранилището след закриване на добива.

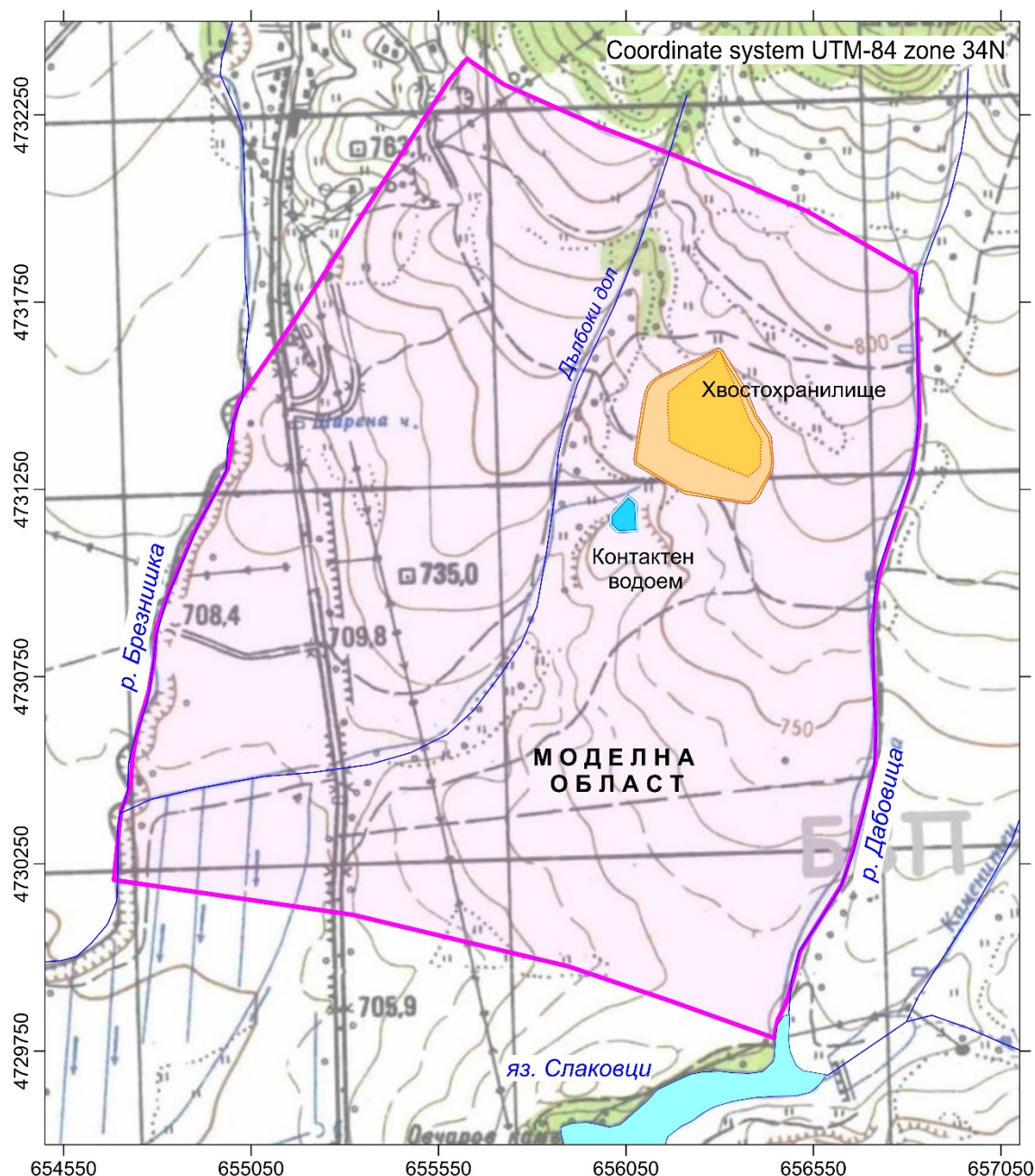
2. КОНЦЕПТУАЛЕН МОДЕЛ

Съставената обща концепция за хидрогеоложките условия в района на изследвания обект и прилежащите му територии, която е имплементирана в разработените числени модели, съдържа следните допускания:

2.1. Източници на замърсяване и реципиенти. Ключови замърсители.

Комплексният анализ на техногенните условия в периода на изграждане и експлоатация на системата за управление на отпадъците от преработването на полезните изкопаеми от находище „Милин камък“, гр. Брезник дава основание да се приеме, че потенциалните източници на замърсители, които е възможно да окажат някакво въздействие върху състава и качествата на подземните и повърхностните води са хвостохранилището и контактния

водоем (Фиг. 12 и Фиг.13). В това си качество двете съоръжения могат да бъдат разглеждани и след закриване на добива, по време на тяхната рекултивация и за един продължителен следващ период от няколко десетилетия. Разбира се, това допускане е направено под условие за драстично нарушаване на технологичния проект и/или настъпване на тежки аварийни ситуации.



Фиг. 13. Източници на замърсяване и реципиенти. Граници на моделната област.

Предвид конкретните хидролого-хидрогеоложки условия в района на потенциалните източници като основни приемници и възможно най-близки реципиенти на замърсители са р. Брезнишка, р. Дабовица и дерето с непостоянен отток Дълбоки дол, а в по-общ план и главната река в региона – р. Конска (Фиг. 4 и Фиг.13).

Разработването на компютърни модели за оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води не е нужно да включва изследване поведението на всички съдържащи замърсители в потенциалните източници. Макар и привлекателен като възможност, екстензивният подход на изследване е свързан с огромни разходи на средства, без това да

се компенсира с по-високо качество на крайните резултати. Същевременно, не винаги е възможно и да се посочат конкретни данни за вида и концентрациите на целия букет от замърсители в състава на отделяния от депонираните отпадъци инфилтрат, какъвто впрочем е и конкретният случай на изследвания обект. Ето защо, за всеки конкретен източник от големия брой замърсители се избират два или по-рядко повече „ключови“ замърсители, по отношение на които се правят количествени екологични оценки и прогнози чрез проиграване на различни консервативни сценарии. Главни критерии при този избор са: (i) концентрацията на замърсителя в източника; (ii) подвижността на замърсителя в подповърхностното пространство и подземните води; (iii) способност на замърсителя да влияе върху киселинността и окислително редукирания потенциал на средата, респ. да генерира промени на геохимичните бариери; (iv) вредно въздействие върху човешкото здраве и околната среда. Последният критерий визира не само прякото въздействие на замърсителя като особено опасен или много вреден, но и неговата роля на катализатор на физикохимични процеси, които биха влошили общата екологична обстановка.

Основните задачи на моделните изследвания е посредством компютърни симулации да се направят количествени оценки и прогнози за:

- Максималния обхват на замърсените зони в подповърхностното пространство и подземните води около потенциалните източници, респ. на пространствените граници на зоната на въздействие върху елементите на околната среда, в това число върху подземните и повърхностните води.
- Границите на най-интензивно въздействие или замърсяване, включително и с токсични замърсители (например с тежки метали) около източниците.

Така дефинираните задачи до известна степен определят и избора на ключови замърсители за всеки конкретен обект.

Решаването на първата задача предполага моделите да симулират поведението на практически несорбируеми и съдържащи се в големи количества в рудничните и отпадните производствени води компоненти. Такива са например хлоридите йони, сулфатните йони, някои органични вещества и др. В находище „Милин камък“ орудяването е сулфиден тип, което предполага рудничните води, отпадъчните материали от преработвателната дейност, отпадъчните води и отделяният от депонираните отпадъци инфилтрат да се характеризират с високи концентрации на сулфатни йони. При втората задача е уместно да се симулира поведението на най-подвижните силно токсични тежки метали, тъй като те са определящи маркери за детерминиране границите на зоните с най-интензивно въздействие или замърсяване около източниците. Например, такива могат да бъдат някои от много токсичните и силно подвижни метали и металоиди като кадмий, арсен и др.

Въз основа на направения анализ, съобразно типа на орудяването в находище „Милин камък“, технологията за преработка на полезните изкопаеми и предлаганата нова технология за управление на отпадъчните материали, при моделните изследвания и базираните на тях оценки и прогнози е уместно като ключови замърсители да се използват два от най-индикативните за обекта замърсителя - сулфатният йон (SO_4) и арсенът (As).

2.2. Граници и елементи на миграционното поле. Моделна област.

Моделните изследвания обхващат цялата площ и всички елементи на миграционното поле, което включва частта от подповърхностното пространство където е възможно да мигрират постъпилите от потенциалния източник (емитера) замърсители.

В план миграционното поле заема територията от източника на замърсяване до първите приемници (реципиенти). По дефиниция като такива се приемат най-близките дерета, реки или повърхностни водоеми, в които е възможно да се дренира замърсения подземен поток. С оглед на това е прието моделната област да обхваща проектните площи на потенциалните

емитери – хвостохранилището и контактния водоем и прилежащите им територии до най-близките реципиенти – р. Брезнишна, р. Дабовица и близкото дере Дълбоки дол (Фиг. 13).

В разрез миграционното поле включва три основни елемента:

- инженерните защитни бариери в основата на потенциалните източници (хидроизолационни геомембрани и геосинтетични облицовки, дренажни съоръжения, противифилтрационни глинести екрани и други защитни елементи пречат на прякото навлизане на замърсители в подповърхностното пространство);
- ненаситената зона под потенциалните източници, която обхваща пространството от основата на източниците или долнището на последната инженерна бариера до нивото на подземните води, т.нар. зона на аерация (формално инженерните бариери са част от ненаситената зона);
- водонаситената част от подповърхностното пространство, включваща всички хидрогеоложки единици от състава на потенциално застрашения водоносен комплекс.

Първите два елемента (инженерните бариери и ненаситената зона), както и процесите в потенциалните източници са обект на изследване в представените по-долу едномерни хидравлични и солеви модели. Количествените оценки и прогнози за евентуалното разпространение на замърсители във водонаситената зона и достигането им до най-близките реципиенти са направени посредством тримерни филтрационни и миграционни модели при отчитане резултатите от едномерните модели.

Важно е да отбележим, че моделите разглеждат консервативни сценарии, при които голяма част от инженерните бариери (хидроизолационни геомембрани, геосинтетични облицовки, дренажни съоръжения и др.) са изключени по причина, че те априори не допускат изтичане на замърсени емисии под източниците. Доказателство за това са не само техните технически спецификации и проектни параметри, но и резултатите от проиграните варианти на едномерни модели при отчитане действието на хидроизолационните защити. Симулираните консервативни сценарии дават оценка на защитните способности на геоложката среда и силно уплътнения пласт глини в основата на двете съоръжения, т.е. дават отговор на въпроса какви ще са екологичните последици при драстично неспазване на технологичния проект и/или при много тежки аварийни ситуации, водещи до нарушаване на функциите на инженерните бариери.

2.3. Инженерни бариери и зона на аерация под източниците

Предвид направения по-горе в т. 2.2 коментар относно голямата сигурност, която обезпечава системата от инженерни бариери и дренажи под дъното на хвостохранилището и контактния водоем, в моделните изследвания е разгледан консервативен сценарий, който предполага частично действие на една и/или две бариери, с допълнителен вариант на сигурност при отчитане защитното действие на хидроизолационната геомембрана (HDPE) в основата на долния изолиращ екран (ДИЕ). Разработените модели отчитат и естествената защита, която осигурява зоната на аерация под потенциалните източници.

По-конкретно използваната в компютърните симулации концептуална схема включва следните елементи:

Инженерни бариери

Силно уплътнен (валиран) пласт глини

Представлява част от геоложката среда в приповърхностната част на земната основа на хвостохранилището и контактния водоем. Формиран е в резултат на уплътняване с валяк (валиране) на глините в най-горната част на разреза след предварително заравняване на терена и преди полагане на другите елементи от защитния екран и депонирането на филтрирания отпадък (кек). Средната дебелина на този пласт е около

0,5 m. При сходни геоложки условия и начин на уплътняване на земната основа практическят опит показва, че след валирането се постига коефициент на филтрация на пласта вариращ в диапазона от $1 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ cm/s. В случая, с известен запас за стойността на този параметър може да се приеме горната граница на посочения диапазон, т.е. $k = 5 \cdot 10^{-5}$ cm/s = $4,3 \cdot 10^{-2}$ m/d.

Долен изолиращ екран под хвостохранилището

Поликомпонентна система, включваща хидроизолационна геомембрана (HDPE) с дебелина 2 mm и напълно водонепропусклива; платно от нетъкан геотекстил с площна маса 400 g/m^2 и коефициент вертикална водопрopusкливост $10^{-1} - 10^{-3}$ cm/s; площен дренаж от трошен камък фракция 4-20 mm с коефициент на филтрация $k \geq 10^{-3}$ m/s; платно от термослепен нетъкан геотекстил с коефициент на вертикална водопрopusкливост $10^{-2} - 10^{-3}$ cm/s.

Долен изолиращ екран под контактния водоем

Двукомпонентна система, съставена от хидроизолационна геомембрана (HDPE) с дебелина 2 mm, напълно водонепропусклива и площен дренаж от трошен камък фракция 4-20 mm с коефициент на филтрация $k \geq 10^{-3}$ m/s.

Зона на аерация (ненаситена зона)

Дебелината на ненаситената зона под двата източника варира в твърде широки граници - от 3 до 10 m, като средната стойност е около 6 m. Изградена е от няколко литоложки разновидности, които могат да се групират в две нискорангови хидрогеоложки единици – горен слабо проницаем пласт и долен проницаем пласт.

Горен слабо проницаем пласт

Изгражда приповърхностната част на неводонаситената зона. Обхваща регионално добре издържан пласт от делувиялно-пролувиялни прахово-песъчливи, песъчливи и чакълесто-песъчливи глинни и глинни с чакъл. Общата дебелина на този пласт под хвостохранилището варира в диапазона от 1 до 5 m, средно около 2,5-3,0 m, а под контактния водоем – между 2 и 10 m, средно около 4,5 m. Коефициентът на филтрация на тези глинни по данни от проведените експресни водоналивания в сондажи варира в границите от $6,0 \cdot 10^{-2}$ до $1,5 \cdot 10^{-1}$ m/d, средно около $1,2 \cdot 10^{-1}$ m/d.

Долен проницаем пласт

Заляга непосредствено под глинестата покривка. Изграден е от силно изветрели и в различна степен напукани вулкански скали – туфи, андезитови туфи, андезитови брекчи и др. Средната дебелина на този пласт е около 2-3 m. Коефициентът на филтрация, определен по данни от експресни водоналивания в сондажи, варира в диапазона между $2,3 \cdot 10^{-1}$ и $1,0 \cdot 10^{-0}$ m/d, средно около $4,5 \cdot 10^{-1}$ m/d.

При моделните изследвания в състава на ненаситената зона следва да се добави и насипаният в хвостохранилището филтриран отпадък (кек). След закриване на добива неговата дебелина в най-издигната част на съоръжението ще достигне до 27 m и повече.

Следва да отбележим, че за миграционните характеристики (коефициент на разпределение K_D , надлъжна дисперсия α_L и коефициент на молекулярна дифузия D_m) на инженерните бариери и зоната на аерация не са провеждани лабораторни изследвания или полеви индикаторни тестове и техните стойности са приети по литературни данни при отчитане на данните за техния литоложки тип и зърнометричен състав. С много голям инженерен запас са направени две консервативни допускания относно задържащата способност на ненаситената среда спрямо ключовите замърсители SO_4 и As. Първото допускане гласи, че сулфатните йони са практически несорбируеми, не се задържат от филтрационната среда и за тях K_D е нула, а забавящият фактор R_f – единица. Второто

консервативно допускане приема за K_D на арсена минималната стойност ($7.5 \text{ cm}^3/\text{g}$) в диапазона от посочените в литературата таблични стойности, която е с няколко порядъка по-ниска от максимума за подобен тип среда. За надлъжната дисперсия α_L и коефициента на молекулярна дифузия D_M също по литературни данни и съобразно физичните характеристики на средата са приети консервативни стойности, съответно $\alpha_L = 0,5 \text{ m}$ и $D_M = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{d}$. Необходимо е да направим уточнението, че посочените стойности на K_D , α_L и D_M са приети в едномерните модели като изчислителни за всички пластове от ненаситената зона, включително силно уплътнения пласт глина и депонирания кек, тъй като те са твърде близки по съдържащите се в тях финнозърнести, прахови и глинести фракции.

2.4. Водонаситена зона

2.4.1. Хидрогеоложки единици

В регионален план в рамките на моделната област се отделят три основни хидрогеоложки единици – Алувиален водоносен хоризонт (alQ^{aq}), Пролувиално-делувиален водоносен хоризонт ($pr-dlQ^{aq}$) и Слабо водоносен порово-пукнатинен комплекс (K_2^{cmx}) – Фиг. 14. В съответствие с възприетата за Р България официална номенклатура на подземните водни тела (ПВТ) първите две хидрогеоложки единици (alQ^{aq} и $pr-dlQ^{aq}$) са съставна част от ПВТ BG4G000000Q007, а третата (K_2^{cmx}) е част от ПВТ BG4G001PtPz027.

Алувиален водоносен хоризонт (alQ^{aq})

Обхваща част от малка част от алувиалната тераса на р. Конска и нейните леви притоци р. Брезнишка, р. Дабовица и дере Дълбоки дол. Изграден е от чакъли и пясъци, в различна степен заглинени. Общата дебелина на тези материали е между 10 и 25 m. Средният коефициент на филтрация е около 20 m/d.

Пролувиално-делувиален водоносен хоризонт ($pr-dlQ^{aq}$)

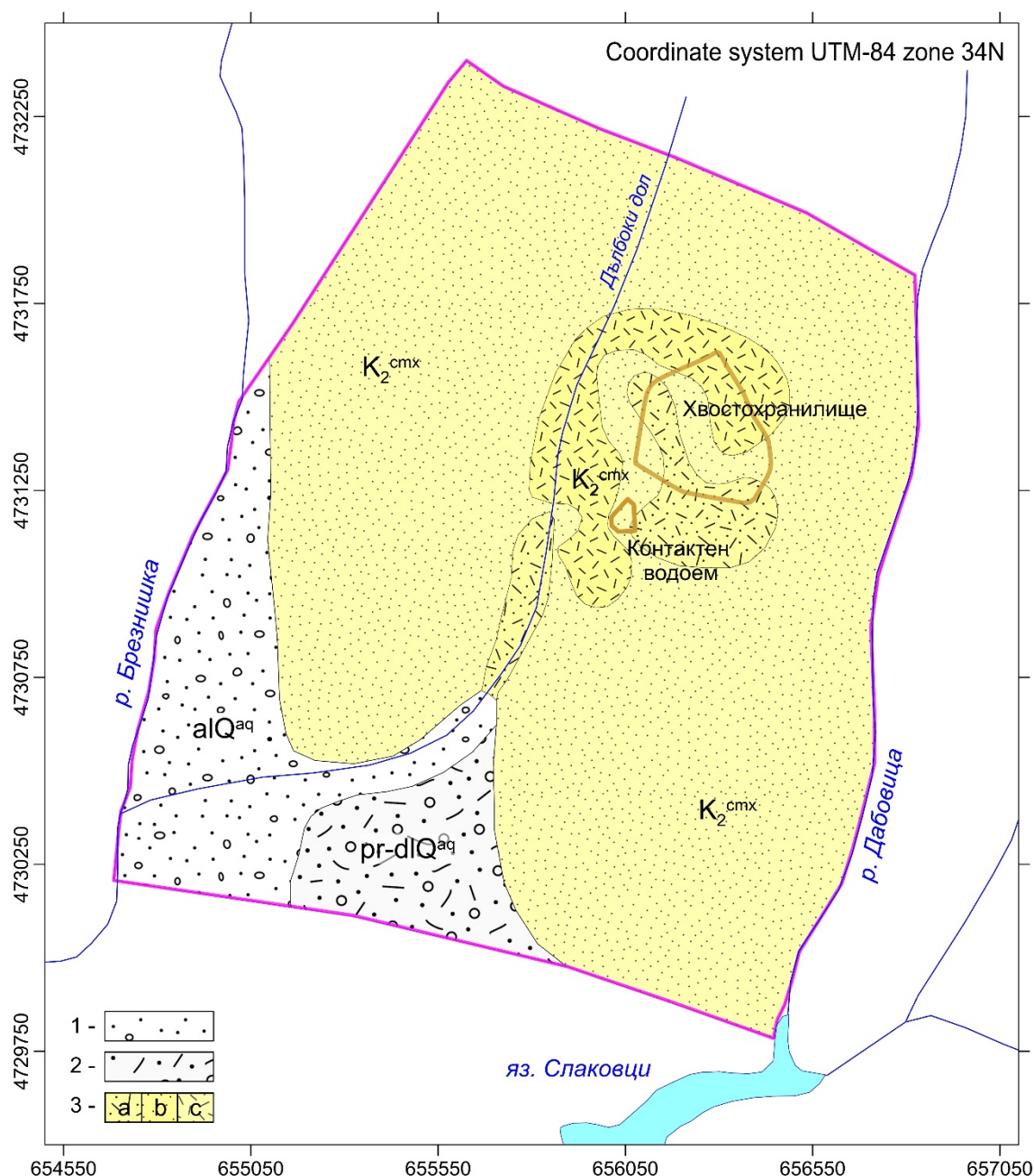
Формиран е в полегат склон към терасата на р. Конска, на юг от дере Дълбоки дол. Изграден е от чакъли и отделни валуни, с глинест и глинесто-песъчлив запълнител. Дебелина на хоризонта е около 10-15 m, средният коефициент на филтрация - около 10 m/d.

Слабо водоносен порово-пукнатинен комплекс (K_2^{cmx})

Слабо водоносният комплекс е изграден от скалите от вулcano-седиментния комплекс, включващ в състава си няколко геоложки формации с горнокредна възраст и покриващия ги пласт от делувиални и делувиално-пролувиални глинести разновидности.

В литоложки аспект скалният комплекс е твърде пъстр. Представен е главно от туфи, туфити, агломератови туфи, андезитови туфи, андезитови брекчи и андезити, с ограничено присъствие на мергели, варовити мергели и др. В горната си част до дълбочина 20-25 m, рядко повече, тези скали са в различна степен напукани, изветрели, на места силно дезинтегрирани и разложени до глина. На по-голяма дълбочина вторичните промени постепенно затихват, скалите са слабо напукани и относително здрави. Глинестата покривка е доста разнородна. Представена е от глинни, прахови и песъчливи глинни с прослойки от глинест пясък, глина с чакъл и по-едри скални късове. Общата дебелина на тези материали е от няколко до не повече от 9-10 m.

Типът на колектора е поров до порово-пукнатинен. Водопропускливостта на средата като цяло е много ниска, средният коефициент на филтрация обикновено варира в диапазона от $5 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-1} \text{ m/d}$, много рядко достига и до 1 m/d. Като цяло ресурсите на подземни води в тази формация са малки и без особено стопанско значение.



Фиг. 14. Граници на хидрогеоложките единици

Условни означения: 1 – Алувиален водоносен хоризонт alQ^{aq} ; 2 – Пролувиално-делувиален водоносен хоризонт $pr-dlQ^{aq}$; 3 – Слабо водоносен порово-пукнатинен комплекс K_2^{cmx} / Горен водопрпусклив пласт – 3a. Проницаема зона, 3b. Средно проницаема зона, 3c. Слабо проницаема зона.

В границите на слабо водоносния комплекс, обаче, са ситуирани потенциалните източници на замърсяване и той реално е главният пряко застрашен от техногенно въздействие подземен воден обект. По тази причина през последните години е бил обект на по-детайлни изследвания, главно във връзка с осъществявания добив от находище „Милин камък“. Основен обект на тези изследвания са площадките на хвостохранилището и контактния водоем. Резултатите от проведените в периода 2018-2023 г. комплекс от сондажни проучвания, електротомографски изследвания, лабораторни анализи и филтрационни тестове дават основание в слабо водоносния комплекс (K_2^{cmx}) до дълбочина 45-50 m да се отделят две ниско рангови хидрогеоложки единици – Горен водопрпусклив пласт (HGU-1) и Долен слабо водопрпусклив пласт (HGU-2). Допълнително, съобразно резултатите от гранулометричните анализи и филтрационните тестове, в горния

водопронепусклив пласт са отделени три единици от по-нисък ранг, чиито граници са илюстрирани на Фиг. 14.

Детерминирани в слабо водоносният порово-пукнатинен комплекс хидрогеоложки единици имат следното пространствено разпространение и най-общи характеристики:

Горен водопронепусклив пласт (HGU-1)

Обхваща приповърхностния разрез до дълбочина от 2-3 до 25 m. В състава си включва кватернерни делувиялни наслаги и най-изветрелите, напукани и вторично променени части на горнокредния вулкански комплекс. В горната си част е изграден от глина, пясъчливи глини и чакълесто-пясъчливи прослойки с обща дебелина в диапазона между 3 и 5 m. Под кватернерните наслаги разрезът е представен от силно изветрели и напукани вулкански и вулкано-седиментни скали – туфобрекчи, туфи, туфити, мергели, алевролити и трахиандезити, на места разложени до чакълеста глина и глини със скални късове. Наличието на зони с изразени различия в литоложкия състав, степента на вторична промяна и зърнометрията на вторичните продукти предпоставят различия във водопронепускливостта на геоложката основа. По данни от проведените сондажни работи, електротомографското изследване и ОФИ в горния водопронепусклив пласт са отделени три единици (зони) от по-нисък ранг – проникваема зона (HGU-1.1), средно проникваема зона (HGU-1.2) и слабо проникваема зона (HGU-1.3). Площните граници на трите зони са илюстрирани на Фиг. 14.

Долен слабо водопронепусклив пласт (HGU-2)

Установен е в долната част на геоложката основа под пласт HGU-1, повсеместно в преминатите разрези с направените проучвателни ядрови сондажи. Изграден е от умерено изветрели и напукани вулкански и вулкано-седиментни скали, а в отделни участъци и в дълбочина обхваща и по-здрави части на скалните комплекси. Дебелината на този пласт надхвърля 35-40 m.

2.4.2. Хидродинамични свойства и миграционни характеристики

Голямата хетерогенност на отделените хидрогеоложките единици от различен ранг е предпоставка за големи различия в техните хидродинамични свойства – коефициент на филтрация k и коефициент на водоотдаване S . Стойностите на коефициента на филтрация k за всяка хидрогеоложка единица са определени по данни от проведените от различни организации и по различно време голям брой лабораторни изследвания и полеви тестове *in situ* – опитни водочерпения и експресни опити. За коефициента на водоотдаване S са използвани таблични стойности в зависимост от зърнометричния състав и/или степента на напуканост и вторична промяна на литоложките разновидности. Представените в Табл. 5 изчислителни стойности на хидродинамичните параметри k и S са прецизирани при калибрацията на представения по-долу в т. 3.3 основен филтрационен 3D модел.

Основните миграционни параметри, които детерминират условията за движение на ключовите замърсители SO_4 и As във водонаситена среда са коефициентът на разпределение K_D , активна порестост n_0 , надлъжна дисперсивност α_L и коефициент на молекулярна дифузия D_M . В случая тези параметри не са били обект на някакво локално изследване с индикаторни тестове, поради което са определени по литературни данни, което е рутинна практика с доказана ефективност при моделните изследвания за оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от различни техногенни източници. Приетите изчислителни стойности на K_D , n_0 , α_L и D_M за хидрогеоложките единици от първи и втори ранг са дадени в Табл. 5. Те са определени съобразно цитираните в литературата таблични данни за литоложки разновидности, изграждащи съответната хидрогеоложка единица. Впоследствие са доуточнени при калибрацията на миграционните 3D модели.

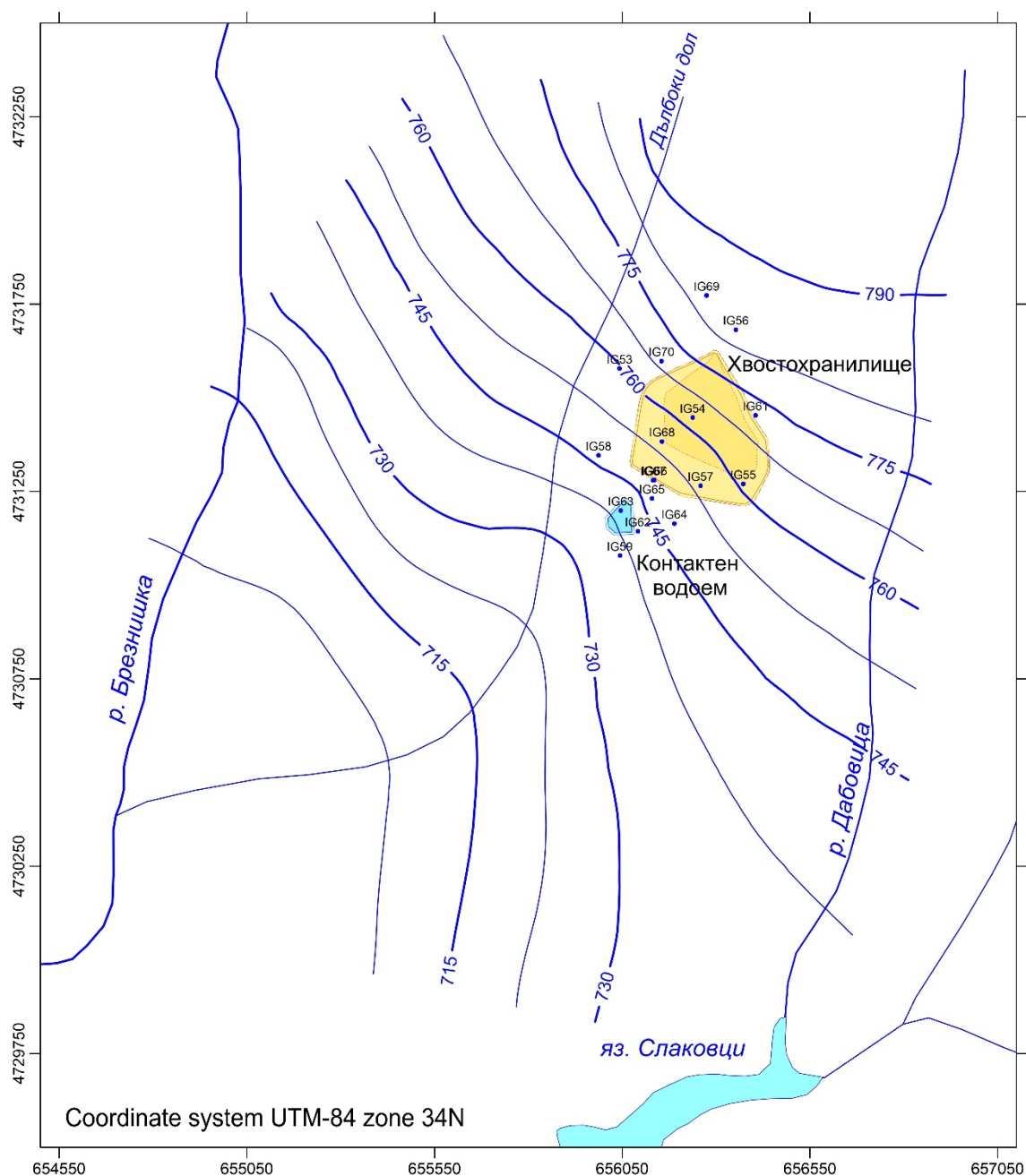
Таблица 5. Хидродинамични свойства и миграционни характеристики на хидрогеоложките единици

Хидрогеоложки единици			Хидродинамични свойства		Миграционни характеристики				
Ранг 1	Ранг 2	Ранг 3	k, m/d	S, -	n ₀ , -	α_L , m	D _M , m ² /d	K _D , cm ³ /g	
								SO ₄	As
Алувиален водоносен хоризонт (alQ ^{aq})			20,0	0,10	0,10	9,5	2,0E-04	0,28	3,0
Пролувиално-делувиален водоносен хоризонт (pr-dlQ ^{aq})			10,0	0,05	0,05	5,7	2,5E-04	0,35	3,5
Слабо водоносен порово-пукнатинен комплекс (K ₂ ^{cmx})	Горен водопропусклив пласт (HGU-1)	Проницаема зона (HGU-1.1)	0,20	0,03	0,03	3,1	3,0E-04	0,55	7,5
		Средно проницаема зона (HGU-1.2)	0,12	0,02	0,02				
		Слабо проницаема зона (HGU-1.3)	0,05	0,01	0,01				
	Долен слабо водопропусклив пласт (HGU-2)		0,002	0,001	0,001	1,2	5,0E-04	0,70	10,0

При определянето на стойностите, представени в Табл. 5 са използвани различни литературни източници (Adams and Gelhar, 1992; Spitz and Moreno, 1996; Anderson et al., 2015; Гълъбов и Стоянов, 2005; Стоянов, 2003, 2019 и др.), както и компютърната програма Enviro Base v.2.0, съдържаща база данни с таблични стойности за k , S , n_0 и α_L .

2.4.3. Структура на филтрационното поле

Структурата на филтрационното поле е определена по данни от проведеното проучване през 2023 г. Използвани са данни за измерените през месец септември статичните водни нива (СВН) в изградените проучвателните сондажи на площадките за хвостохранилище и контактен водоем. При обработката към масива от стойности на СВН са добавени и данни за водните стоежи в р. Брезнишка, р. Дабовица и Дълбоки дол, определени от топографска карта М 1:5000. По тези данни с компютърната програма Surfer v.11.2 е съставена пиезометричната карта, представена на Фиг. 15.



В регионален план структурата на филтрационното поле се контролира от р. Конска и нейния най-голям приток р. Брезнишка. Към тях е ориентиран идващият от СИ подземен поток, като генералната му посока е на ЮЗ-З. Пиезометрията, представена на Фиг. 15, показва ясно диференцирано разпределение на хидравличния градиент по посоката на движение на подземните води. Видимо той е най-висок в района на хвостохранилището и контактния водоем – около 0,075. Встрани от съоръженията и на югозапад постепенно намалява до стойности 0,04-0,05. След навлизането на подземните води в алувиалните наслаги на р. Брезнишка градиентът много рязко спада с около порядък до стойност 0,0065.

В локален план подземният поток под хвостохранилището и контактния водоем е ориентиран на югозапад към дере Дълбоки дол. Това предполага, че при евентуално изтичане на замърсители от потенциалните източници, замърсените подземни води ще се дренират в дерето и оттам да достигнат и до р. Брезнишка.

2.4.4. Хидравлични връзки

Сложната геометрия и голямата хетерогенност в слабо водоносния порово-пукнатинен комплекс предпоставят затруднен водообмен не само между детерминираните нискорангови единици и зони, но и между по-малки участъци на различни хипсометрични нива. Това води до локални аномалии в общото разпределение на напорите и създава условия за по-бавен масообмен. Независимо от това в слабо водоносния комплекс е формиран общ подземен поток, хидравлично свързан с двете реки и дерето. Основната част от този поток се дренира в алувиалния водоносен хоризонт, а друга по-малка част в Дълбоки дол, р. Брезнишка и пролувиално-делувиалния хоризонт. Това са и основните възможни приемници на замърсени от хвостохранилището и/или контактния водоем подземни води.

2.5. Външни и вътрешни гранични условия. Източници и стокове

2.5.1. Реки

Река Брезнишка. Маркира западната граница на изследвания район (Фиг. 13). Речното течение е насочено на юг, със среден хидравличен наклон 0.0045. Речното легло е чакълесто-песъчливо, което предполага пряка хидравлична връзка между реката и подземните. Водните стоежи са между коти 702 и 720 m, които са едни от най-ниските стойности на напора в изследвания район. Това е причината р. Брезнишка да дренира основната част от подземния поток и целия повърхностен отток от водосбора на дере Дълбоки дол. Очевидно, тя е не само главният фактор, контролиращ структурата на филтрационното поле, но и краен реципиент на замърсени води.

Река Дабовица. Очертава източната граница на моделната област. Води началото си от възвишението Св. Никола, на около 250 m под върха (Фиг. 13). Представлява плитка долина с полегати склонове - суходолие без постоянен годишен отток. Средната продължителност на пресъхване е между 1,5 и 2,5 месеца, рядко повече. Захранва яз. Слаковци, който прихваща и други две суходолия - Каменитец и Бачварац. Средният сумарен приток от трите суходолия е около 10-15 L/s. След язовирната стена те изтичат под формата на общ поток, който се зауства в р. Конска. Средният хидравличен наклон на потока в р. Дабовица е голям – около 0.035. По-високите коти на водните стоежи спрямо нивата на подземните води в моделната област предполагат, че част от речния отток се дренира в скалния масив.

Дере Дълбоки дол. Премахва на приблизително 60-70 m от западната граница на хвостохранилището и на около 150 m от контактния водоем (Фиг. 13). Неговата дължина е около 3-3,5 km. Води началото си под височината Бърдото и се зауства в р. Брезнишка. Дерето е относително дълбок ерозионен базис. Има непостоянен отток, суходолие с два до три месечен период на пресъхване. През пролетното пълноводие в створа на дерето до

хвостохранилището е регистриран отток около 0.3-0.4 L/s. По-високите нива на подземните води под потенциалните източници спрямо ерозионния базис в дере Дълбоки дол предполагат, че може да се очаква евентуалните замърсители да мигрират към дерето. Всичко това дава основания да приемем, че дере Дълбоки дол е главният приемник на замърсени води от хвостохранилището и контактния водоем, които с повърхностния отток е възможно да достигнат до р. Брезнишка.

2.5.2. Инфилтрация от валежите

В изследвания район са отделени две зони с различно инфилтрационно подхранване. Техните граници са очертани въз основа на различията в литоложките характеристики и водопропускливостта на покривния слой в основните хидрогеоложки единици. Детерминирани по този начин зони са две:

- ~ Зона 1. Обхваща територията на слабо водоносния комплекс K_2C^{mx} ;
- ~ Зона 2. Включва в границите си алувиалния водоносен хоризонт alQ^{aq} и пролувиално-делувиалния водоносен хоризонт $pr-dlQ^{aq}$.

Скоростта на инфилтрация W за всяка зона е изчислена съобразно водопропускливостта на приповърхностния слой и средногодишната стойност на валежа, която за района на гр. Брезник е $P = 584 \text{ mm}$. При изчисленията са използвани често прилаганите в практиката формули на Bredenkamp за определяне на естествения инфилтрационен поток I при наличие на слабо пропусклив и пропусклив покривен слой (Bredenkamp, 1990). Така определените средногодишни стойности на инфилтрационния поток I и скоростта на инфилтрация W са представени в Табл. 6. Тези стойности са прецизирани при калибрацията на представения по-долу в т.3.3 основен филтрационен 3D модел.

Таблица 6. Средни стойности на инфилтрационния поток и скоростта на инфилтрация

Зона	Тип на покривния слой	Инфилтрационен поток I , mm/a	Скорост на инфилтрация W , m/d	Дял от падналия валеж P , %
Зона 1	Слабо пропусклив	37,8	$1,04 \cdot 10^{-4}$	6,5
Зона 2	Силно пропусклив	81,3	$2,23 \cdot 10^{-4}$	14,0

2.5.3. Подземен приток/отток по латералните граници

Притокът на подземни води по границите постъпва главно от външните за изследвания район части на слабо водоносния комплекс K_2C^{mx} . Осъществява се по северната и източната граница като предполагаемото количество е от порядъка на 1-1,5 (L/s)/km.

По-голямата част от подземния поток се дренира подземно в терасата на р. Конска и нейните притоци, отвъд границите на моделната област. Другата част се оттича към дере Дълбоки дол и в р. Брезнишка.

2.5.4. Приток на техногенни води

Приток на техногенни води във водонаситената зона е възможно да се очаква под дефинираните по-горе в т. 2.1 потенциални източници на замърсяване – хвостохранилището и контактния водоем. Скоростта на инфилтрационния поток, който би преминал през инженерните бариери и зоната на аерация при допускане на хипотезата за евентуални технологични нарушения или аварии, както и концентрацията на ключови замърсители в него на границата ненаситена/водонаситена зона са определени посредством направените симулации с представените по-долу в т. 3.2 едномерни модели.

2.5.5. Потенциално застрашени водоизточници за питейни води

В регионален план на юг от гр. Брезник по данни от БД ЗБР има четири каптирани извора и два дренажа, собственост на ВиК „Перник“, обезпечаващи питейното водоснабдяване на населението от околните селища – Фиг. 8, както и четири шахтови кладенеца за техническо водоснабдяване. Около всички източници за питейни води има организирани санитарно-охранителни зони (СОЗ).

Анализът на конкретните условия и представения картен материал (вж Фиг. 8 и 13) показва, че тези водоизточници, техните СОЗ и водосборните им области са отвъд границите на дефинираното в т. 2.2 миграционно поле. Отсъствието на пресечни точки между зоната на евентуално въздействие на хвостохранилището и контактния водоем и определените граници на СОЗ е достатъчно условие, което гарантира качеството на добиваните води и дава основание да приемем, че в изследвания район няма потенциално застрашени водоизточници за питейни води.

3. МОДЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ПРОГНОЗИ

Главна задача на проведените моделни изследвания е да се направи дългосрочна количествена прогноза за възможното въздействие или замърсяване на подземните и повърхностните води от хвостохранилището и контактния водоем при екстремното допускане, че част от инженерните бариери и защитните съоръжения не изпълняват своите функции. На тази база е направена обоснована оценка относно:

- задържащата способност, респ. естествената защитеност на геоложката основа;
- защитния ефект от силно уплътнения пласт глина под дъното на хвостохранилището и контактния водоем;
- пълното задържане на инфилтратата и замърсените води в източниците, което осигурява геосинтетичната облицовка над уплътнения пласт глина;
- потенциалния риск от замърсяване на подземните и повърхностните води.

За тази цел са разработени числени модели на условията за навлизане и разпространение на ключовите замърсители под дъното на потенциалните източници, с които са разгледани различни консервативни сценарии и работни хипотези.

3.1. Методически бележки

При разработването на числените модели е използван следния общ методически подход:

- Условията за миграция на ключовите замърсители SO_4 и As през инженерните бариери и зоната на аерация са симулирани посредством 1D модели, а възможностите за разпространението им в подземните води – с 3D модели. Получените едномерни решения са използвани като входни данни при разработването на тримерните. Ще отбележим, че е възможно да се разработят и по-сложни 3D модели, които включват всички елементи на миграционното поле, но те изискват много голям компютърен ресурс, особено при изготвянето на дългосрочни прогнози. Същевременно, разделянето на процесите в ненаситената и водонаситена среда не намалява априори точността на моделните решения, дори напротив – прави математическите модели по-устойчиви и дава възможност за получаване на по-прецизирани анализи и прогнози.
- Моделната област в 1D модели обхваща характерни разрези в една централно разположена точка или повече точки, равномерно разпределени по цялата площ на източниците. Моделната област в 3D моделите обхваща територията от източниците до първите реципиенти на замърсения подземен поток.

- Хидрогеоложките единици и инженерните бариери са пресъздадени в пълно съответствие с техните основни характеристики: геометрични – дебелина, дължина или площ на разпространение; физични – плътност, порестост; филтрационни – коефициент на филтрация, коефициент на водоотдаване; миграционни – коефициенти на разпределение, дисперсивност и молекулярна дифузия. В зоната на аерация допълнително са зададени и специфичните за ненаситената среда параметри: естествена влажност, коефициент на влагопроводност и връзката между всмукващия потенциал и влажността $\psi = f(\theta)$.
- Вертикалното инфилтрационно подхранване е изчислено и зададено в съответствие с климатичните, почвените и техногенните условия на разглеждания обект.
- Механизмът на масопренасяне е заложен във възможно най-пълния му вид: конвективно-дифузионен пренос, съпроводен с процеси на сорбция-десорбция, механична дисперсия (надлъжна, напречна и вертикална), необратимо елиминиране и смесване.
- Приети са и следните опростяващи моделирането разумно консервативни допускания: инфилтрационният поток през инженерните бариери и по площите извън източника е равномерно разпределен; концентрацията на замърсителите е променлива величина, функция на прилаганата технология и времето от началото на експлоатацията на обекта, хомогенно разпределена по участъци в източника.
- С моделите е изследвана възможната миграция на SO_4 и As, които дават цялостна представа за възможното разпространение на постъпилите под дъното на източниците замърсители в подпочвеното пространство и подземните води. Максималният обхват на въздействието или замърсяването се маркира от практически несорбируемия и много подвижен SO_4 , а най-интензивно засегнатата зона се очертава от един сравнително подвижен представител на токсичните замърсители, какъвто е As.
- Резултатите от моделните изследвания са представени като „относителна концентрация”, т.е. отношение на „текущата” концентрация C_i в даден момент t_i и място x_i, y_i, z_i към началната (входната) концентрация C_0 на съответния ключов замърсител. В случая по целия обем на източниците за началната концентрация е приета стойност $C_0 = 1$ (или $C_0 = 100 \%$).
- Прогнозните изчисления във всички модели са направени за период от 100 години. Общото време на симулацията е разделено на 5 основни стрес периода. Тяхната продължителност е съответно 4, 2, 2, 10 и 82 години. Първите три стрес периода (общо 8 г.) симулират периода на изграждане на хвостохранилището, като площта на зададения в моделите източник расте съобразно илюстрираните на Фиг. 9, Фиг. 10 и Фиг. 11 площи за различните строителни етапи. Четвъртият стрес период (10 г.) симулира периода на планирания 10-годишен институционален мониторинг след прекратяване на добива, когато хвостохранилището е рекултивирано, а контактният водоем – с по-различни, постепенно затихващи функции. Петият стрес период (82 г.) обхваща последния най-дълъг период от дългосрочната стогодишна прогноза.

3.2. Едномерни (1D) модели на условията за миграция на ключовите замърсители през инженерните бариери и зоната на аерация

3.2.1. Методика и инструменти

Числовото моделиране предоставя много големи възможности за описване на водо- и масопреноса в ненаситена среда. Движението на вода и вещества в земната среда е многофакторно явление, което обикновено се осъществява при едновременното протичане

на няколко хидродинамични и физични процеса – конвективен масопренос, хидродисперсия, молекулна дифузия и др. Прогнозните изчисления за миграцията на ключовите замърсители SO_4 и As през инженерните бариери и зоната на аерация са симулирани посредством създаване на едномерни (1D) модели, които се имплементират в компютърната програма Hydrus-1D (Šimůnek et al., 2008).

В алгоритъма на Hydrus-1D се използва числено решение по метода на крайните елементи на уравнението на влагопреноса (уравнение на Richards) в комбинация с уравненията за конвективно-дифузионния пренос на вещество при отчитане на процесите на сорбция-десорбция и дисперсия.

Прогнозните изчисления за разпространението на замърсителите в зоната на аерация (както впрочем и във водоносния пласт) включва винаги две отделни, но взаимно свързани задачи: филтрационна задача, засягаща движението на вода (влага) през ненаситената среда и миграционна задача, свързана с преноса на замърсителите при отчитане на тяхното взаимодействие със средата.

Първата задача се решава посредством хидравлични модели, които изискват познаването на някои важни характеристики на ненаситената среда, в т.ч. двете нелинейни функционални зависимости: всмукващ потенциал / обемно водно съдържание – $\psi = f(\theta)$ и коефициент на влагопроводност / обемно водно съдържание – $k^* = f(\theta)$. Тези зависимости са широко изследвани и подробно описани в специалната литература. В използвания от нас софтуерен пакет Hydrus-1D са заложили най-често препоръчаните, а именно: степенната зависимост $k^* = f(\theta)$ между коефициента на влагопроводност и относителната влажност (Brooks & Corey, 1964 и др.) и зависимостта на всмукващия потенциал от влажността $\psi = f(\theta)$ описана чрез по-сложни криви с “S” - видна форма (“S” - shaped curves) (Haverkamp et al, 1977; van Genuchten, 1980). Последната зависимост се задава чрез коефициентите α и n на кривата, водното съдържание при водонасищане θ_s , остатъчното водно съдържание θ_r и коефициента на филтрация k .

Втората задача се решава посредством солеви модели, за които е необходимо познаване на основните миграционни параметри на различните замърсители за конкретната среда, а именно коефициент на разпределение K_D , коефициент на молекулярна дифузия D_M , коефициент на дисперсия α_L , както и обемната плътност на скелета ρ_d .

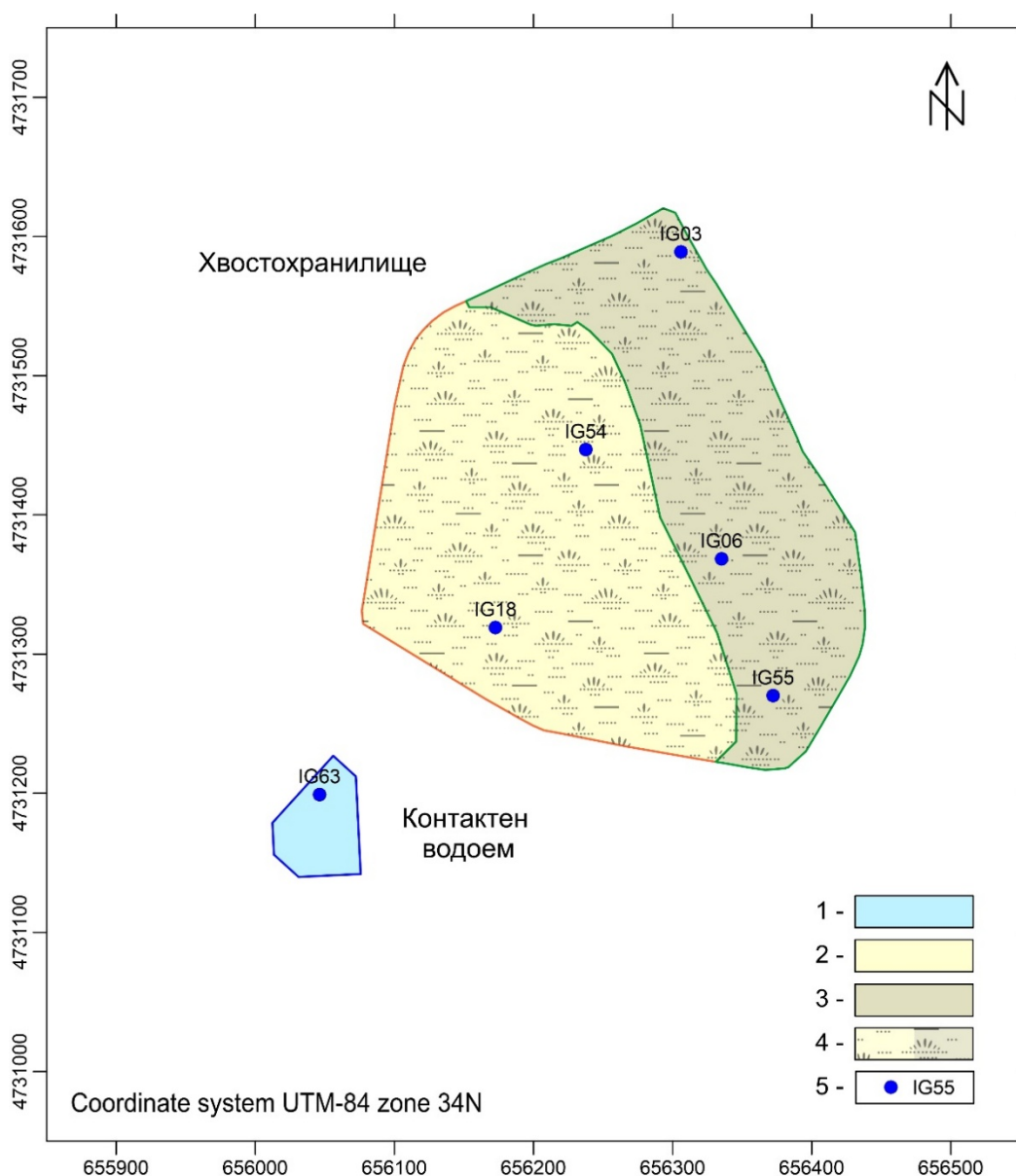
3.2.2. Композиране на едномерните модели

3.2.2.1. Концептуални схеми и характеристики на основните модели

Съставени са шест основни едномерни модела – M1-1D_IG18, M2-1D_IG54, M3-1D_IG06, M4-1D_IG55, M5-1D_IG03 и M6-1D_IG63. Те представляват компютърни симулации на инфилтрационния поток и преноса на вещество в шест пункта по профили IG18, IG54, IG06, IG55, IG03, и IG63, равномерно разпределени в обхвата на хвостохранилището без IG63, който е ситуиран в центъра на контактния водоем (Фиг. 16). Изборът на моделните пунктове, направен с оглед местоположението на проучвателните сондажи, геоложкия строеж и дебелината на ненаситената зона, с отчитане и на технологичните условия, осигурява представителност на резултатите от изготвените по-долу количествени оценки за големината на инфилтрационния поток и възможната миграция на замърсители от източниците през зоната на аерация.

Концептуалната схема на първите пет модела, съставена съобразно избраната технологията на управление на отпадъците и установения геоложки строеж до нивото на подземните води, включва следните разновидности (по-надолу в текста означавани като слоеве и/или материали): (1) филтриран отпадък (кек); (2) долен изолиращ екран (ДИЕ) – нетъкан геотекстил 400 g/m^2 , площен дренаж от трошен камък фракция 4-20 mm и платно

от термослепен нетъкан геотекстил; (3) геокран от уплътнена глина; (4) делувиялно-пролувиална глина и туфи. В основата на долния изолиращ екран ще бъде положена хидроизолационна геомембрана (HDPE) с дебелина 2 mm. При изготвянето на модела е възприет консервативен подход за извършване на моделните изследвания и в основната концептуална схема този компонент от ДИЕ не е включен. Предвид техническата спецификация на геомембраната, гарантираща нейната водонепроницаемост, уверено може да се предполага, че тя ще възпрепятства водния поток, т.е. ще има нулева инфилтрация под дъното на източниците. Това бе доказано и с един от моделните варианти, описан по-долу в т. 3.2.2.4. Концептуалната схема на IG63 включва (1) геокран от уплътнена глина и (2) геоложка основа - туфи, като по същите причини не отчита действието на хидроизолационната облицовка (HDPE) на водоема, която по проект ще се положи над уплътнената глина.



Фиг. 16. Пунктове на профилите в основните 1D модели. Площни източници на замърсяване в миграционните 3D модели.

Условни означения: 1 – Контактен водоем; 2 – Хвостохранилище - етап 1; 3 – Хвостохранилище - етап 2; 4 – Хвостохранилище – рекултивирана площ; 5 – Пункт на моделен профил №.

Обобщени данни за геометрията и пластовия състав на зададените в едномерните модели профили са представени в Табл. 7. Общата дебелина на ненаситената зона не е постоянна тъй като дебелината на филтрирания отпадък (кек) е функция на скоростта на запълване на хвостохранилището и поэтапното разширяване на неговата площ в североизточна посока. Това е отчетено в разработените варианти на основните модели (т. 3.2.2.3).

Процесите на влагопренасяне в основните модели са описани посредством модела на van Genuchten, който се дефинира от хидравличните параметри θ_r , θ_s , α , n и коефициента на филтрация k . Техните стойности са определени чрез педотрансформационен функционален анализ, базиран на структурния състав на почвата (Schaap et al., 2001) и полеви опити от района на хвостохранилището. Структурният състав на почвата се определя от съотношението на трите фракции пясък-прах-глина, определено по стандарта на US Department of Agriculture /Министерство на земеделието САЩ/ (García-Gaines, Frankenstein, 2015). При определяне стойностите на θ_r , θ_s , α , n и k е изпълнена следната процедура. Първоначално от пълните зърнометрични криви на отделните слоеве (филтриран отпадък, делувиялно-пролувиална глина и туфи) са определени процентните съотношения на трите фракции. Тези данни са зададени в библиотечния каталог Rosetta, наличен в програма Hydrus-1D, и според съотношенията на фракциите за всеки слой са получени и търсените хидравлични параметри, включително и коефициента на филтрация. Единствено за геоекрана, съотношенията на фракциите определени от каталога на Carsel and Parrish (1988), като в допълнение, коефициентът на филтрация е приет по данни от опитни измервания за този слой. Получените стойности на хидравличните параметри и коефициентите на филтрация на всеки слой са представени в Табл. 8.

При композирането на основните хидравлични модели са използвани следните начални и гранични условия:

- *Начално условие.* Прието е равновесно разпределение на смукващия потенциал по съответния профил във всички модели.
- *Горно гранично условие.* В горната граница на модели M1-1D_IG18, M2-1D_IG54, M3-1D_IG06, M4-1D_IG55 и M5-1D_IG03 по съответния профил е зададено, че постъпва водно количество, равно на разликата между валежите и изпарението. В модел M6-1D_IG63, това гранично условие е дефинирано с напор от 20 cm.
- *Долно гранично условие.* Във всички модели по долната граница на профилите е зададено свободното водно ниво, т.е. смукателен капацитет равен на нула.

Стойността на изпарението се определя по формулата на Харгрийвс (Hargreaves and Samani, 1985), включена в алгоритъма на програма Hydrus-1D. Като входни данни се задават географската ширина, валежите и максималната и минимална температури за определен период.

При изчисленията на база деветнадесет годишна редица от метео-данни за района на обекта (Фиг. 17) са приети медианната средна стойност на валежите и минималните и максимални за този период температури на въздуха (Фиг. 18).

В Табл. 9 са представени метео-данните, които са използвани за определяне на евапотранспирацията в хидравличните модели за профили IG18, IG54, IG06, IG55, и IG03. Тези данни са имплементирани в Hydrus-1D с кратност, съответстваща на продължителността на зададените в моделите стрес периоди. Например, за двегодишен период данните са имплементирани два пъти, за тригодишен – три пъти и т.н.

Таблица 7. Геометрия и пластов състав на профилите зададени в основните 1D модели

Профил	Материал	Дебелина, m	Обща дебелина на ненаситената зона, m
IG18	филтриран отпадък (кек)	13,3*/16,6	15,95/19,25
	долен изолиращ екран (ДИЕ)****	0,45	
	геоекран от уплътнена глина	0,5	
	делувиално-пролувиална глина	1,7**	
IG03	филтриран отпадък (кек)	2,3*** /5,5	7,05/10,25
	долен изолиращ екран (ДИЕ)****	0,45	
	геоекран от уплътнена глина	0,5	
	туфи/андезитови брекчи	3,8**	
IG54	филтриран отпадък (кек)	7,5*** /15,0	9,45/16,95
	долен изолиращ екран (ДИЕ)****	0,45	
	геоекран от уплътнена глина	0,5	
	делувиално-пролувиална глина	1,0**	
IG55	филтриран отпадък (кек)	5,0*** /12,3/15,5	10,75/18,05/21,25
	долен изолиращ екран (ДИЕ)****	0,45	
	геоекран от уплътнена глина	0,5	
	делувиално-пролувиална глина	2,5	
	туфи	2,3**	
IG06	филтриран отпадък (кек)	5,1*** /13,1/16,2	10,5/18,65/21,75
	долен изолиращ екран (ДИЕ)****	0,45	
	геоекран от уплътнена глина	0,5	
	делувиално-пролувиална глина	2,7	
	туфи	1,9**	
IG63	геоекран от уплътнена глина	0,5	4,3
	делувиално-пролувиална глина	3,8**	

* за първите 4 години на компютърната симулация дебелината на филтрирания отпадък се приема определен % от крайната му дебелина;

** до кота свободно водно ниво;

*** за първите 2, и следващите 2 години на компютърната симулация дебелината на филтрирания отпадък се приема определен % от крайната му дебелина;

**** моделите не отчитат действието на хидроизолационната геомембрана (HDPE).

Таблица 8. Хидравлични параметри и коефициенти на филтрация на моделните слоеве

Материал (моделен слой)	Зърнометрични фракции, %			Остатъчно водно съдържание** θ_r	Водно съдържание при водонасищане** θ_s	Емпирична константа α	Емпирична константа n	Коефициент на филтрация k
	пясък* 2,0 – 0,05 mm	прах* 0,05 - 0,002 mm	глина* < 0,002 mm	cm ³ /cm ³	cm ³ /cm ³	cm ⁻¹	-	cm/d
филтриран отпадък (кек)	20	55	25	0,0761	0,4404	0,00600	1,5790	15,00
долен изолиращ екран (ДИЕ)***	n/a	n/a	n/a	0,0450	0,4300	0,00145	2,6800	712,80****
уплътнена глина (геосекран)*****	n/a	n/a	n/a	0,0680	0,3800	0,00800	1,0900	4,3*****
делувиално- пролувиална глина	12	65	23	0,0769	0,4495	0,00570	1,6083	12,84
туфи	32	56	12	0,0516	0,4142	0,00480	1,6604	32,11

* по стандарта на US Department of Agriculture, USA (% пясък, % прах, % глина)

** обемно водно съдържание

*** не отчита действието на хидроизолационната геомембрана (HDPE)

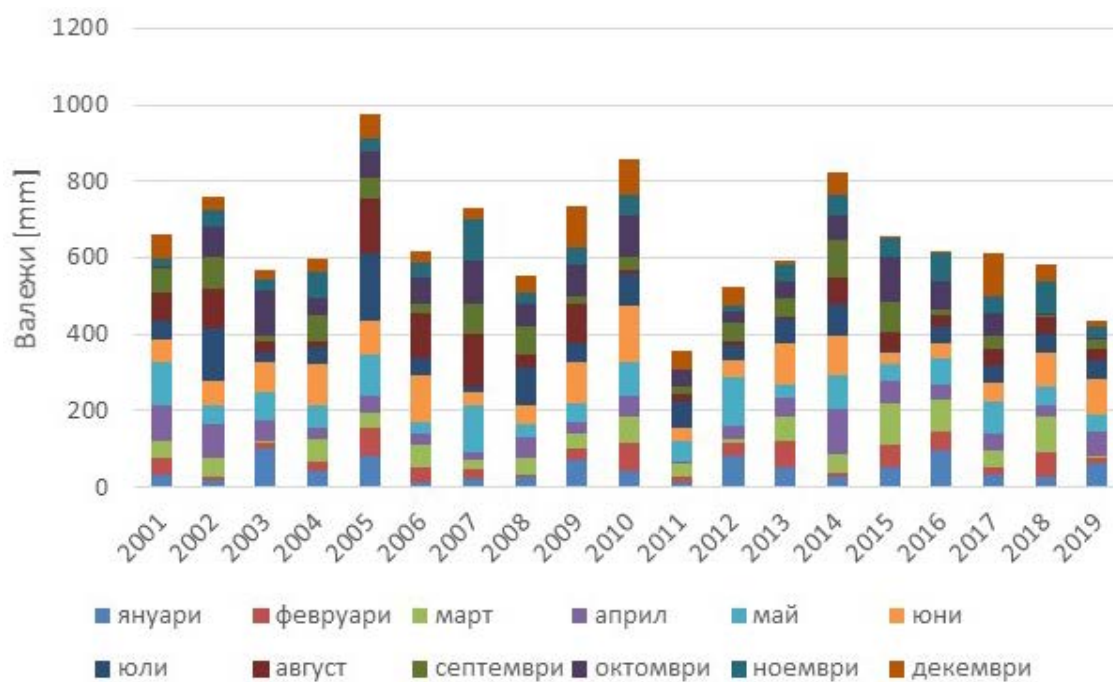
**** библиотечен каталог Rosetta за силно пропускливи типове седименти

***** почвен каталог от Carsel and Parrish, 1988

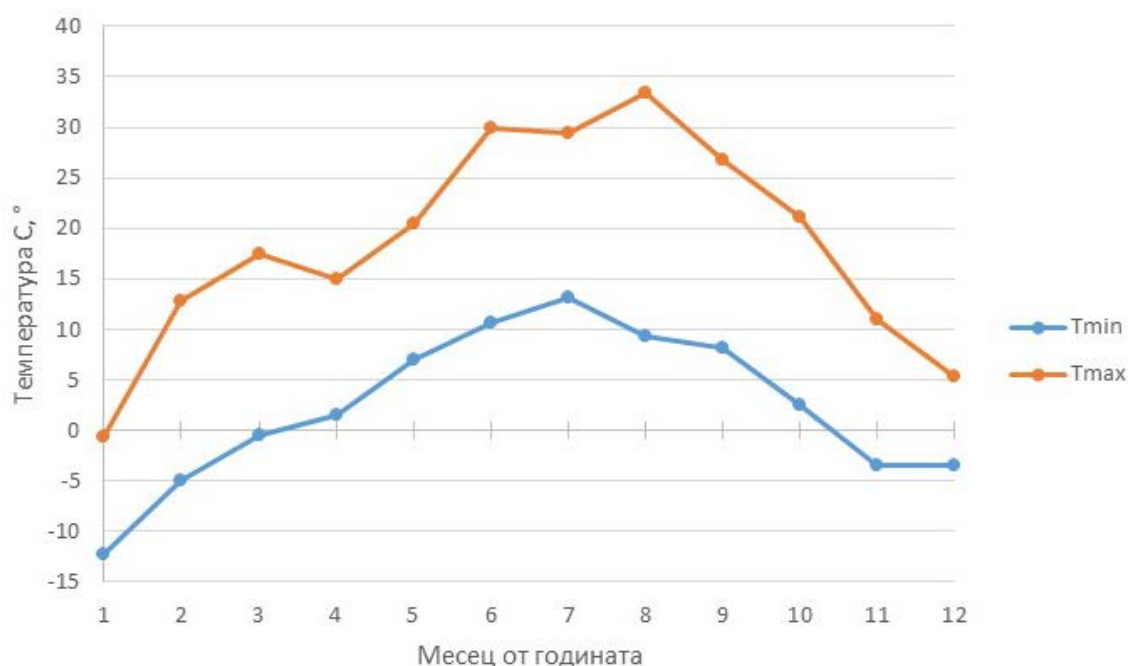
***** стойност на коефициента на филтрация от полеви измервания

Таблица 9. Метео-данни за определяне на изпарението по формулата на Харгрийвс

Месец	Валежи, mm	Осреднена минимална температура, °C	Осреднена максимална температура, °C	Валежи на дневна база, cm/d
януари	31,0	-12,3	-0,7	0,100000000
февруари	22,4	-4,9	12,8	0,080000000
март	41,5	-0,4	17,5	0,133870968
април	45,4	1,5	15,0	0,151333333
май	83,5	7,0	20,4	0,269354839
юни	50,3	10,7	30,0	0,167666667
юли	43,1	13,1	29,4	0,139032258
август	44,3	9,4	33,4	0,142903226
септември	31,4	8,2	26,8	0,104666667
октомври	61,2	2,5	21,1	0,197419355
ноември	42,7	-3,4	11,0	0,142333333
декември	115,3	-3,5	5,3	0,371935484



Фиг. 17. Разпределение на валежите по месеци за периода 2001-2019 г.



Фиг. 18. Разпределение на минималната и максимална температура на въздуха

Таблица 10. Миграционни характеристики на моделните слоеве в солевите модели

Материал (моделен слой)	Коефициент на надлъжна дисперсия α_L , m	Коефициент на молекулярната дифузия* D_m , m ² /y	Обемна плътност на скелета ρ_d , kg/m ³	Коефициент на разпределение K_D , m ³ /kg	
				SO ₄	As
филтриран отпадък (кек)	0,5	3,98E-02	1600	0,0	0,0075
долен изолиращ екран (ДИЕ)	0,5	3,98E-02	1550	0,0	0,0075
геоекран от уплътнена глина	0,5	3,98E-02	1900	0,0	0,0075
делувиално- пролувиална глина	0,5	3,98E-02	1680	0,0	0,0075
туфи	0,5	3,98E-02	1940	0,0	0,0075

*Забележка: коефициент на молекулярна дифузия в свободна вода при 4 градуса Целзий

Масопренасянето в солевите модели се описва по схемата на конвективно-дифузионен пренос с отчитане на съпътстващите процеси обратимо елиминиране (сорбция-десорбция) и дисперсия. Зададените в моделните слоеве стойности на миграционните характеристики – коефициент на надлъжна дисперсия α_L , коефициент на молекулярна дифузия D_m , обемна плътност на скелета ρ_d и коефициент на разпределение K_D за ключовите замърсители SO₄ и As ($K_D^{SO_4}$ и K_D^{As}) са представени в Табл. 10. Повечето от тях са определени по литературни данни, с изключение на стойностите на ρ_d , получени от лабораторни анализи на проби от съответните разновидности. За надлъжната дисперсия α_L и коефициента на разпределение K_D^{As} са приети таблични стойности (Spitz and Moreno, 1996), относими за материали със сходен зърнометричен и/или литоложки състав и съобразно препоръките в наръчника за работа с програма Hydrus-1D. С много голям инженерен запас в разглеждания консервативен сценарий е прието, че SO₄ са несорбируеми, не се задържат от твърдата фаза

($K_D^{SO_4} = 0$) и мигрират със скоростта на инфилтрационния поток. Впрочем, подобни са мотивите приетата таблична стойност на коефициента за арсена за K_D^{As} да е близка до минимума на посочения в литературния източник диапазон. За различните материали са приети еднакви стойности на повечето характеристики, тъй като от една страна тяхната зърнометрия е сходна, а от друга дискрецията на табличните стойности е малка.

Във всички основни модели по целия обем на потенциалните източници за началната (входна) концентрация на ключовите замърсители SO_4 и As е приета стойност $C_0 = 1$. В този случай получените със солевите модели решения се представят в относителни концентрации, т.е. като отношение на прогнозната концентрация C_i в даден момент t_i и дълбочина z_i към началната концентрация C_0 на съответния ключов замърсител в потенциалните източници.

3.2.2.2. Моделни рамки и имплементация на концептуалните схеми

На Фигури 19-24 са представени моделните рамки на шестте основни 1D модела и съответните имплементации на концептуалните схеми на профили IG18, IG54, IG06, IG55, IG03 и IG 63 в програма Hydrus-1D. Геометрията и състава на моделните слоеве съвпада с описаните по-горе разновидности (Табл. 7). Процесът на имплементация включва освен задаване на дебелината на слоевете, техните хидравлични параметри θ_r , θ_s , α , n и коефициенти на филтрация k (Табл. 8), миграционните характеристики α_L , D_M , ρ_d , $K_D^{SO_4}$, K_D^{As} (Табл. 10) и метео-данните (Табл. 9), така и пространствена дискретизация на съответния профил (Фигури 19-24). Избрана е дискретизационна (нодална) мрежа от общо 500 стъпки (брой точки/ноди), за които се решава конвективно-дифузионното уравнение. Оттук следва, че за профили IG18, IG54, IG06, IG55, и IG03, една стъпка е равна съответно на 0,0385 m; 0,0339 m; 0,0435 m; 0,0425 m; и 0,0205 m. За IG 63 тези стойности са съответно 200 и 0,0215 m. Подобна степен на дискретизация (големина на стъпките) изглежда доста подробна за профили с много-метрова дебелина, но това е важно условие за получаването на коректни резултати.

3.2.2.3. Варианти на основните модели

Разработени са сумарно 22 варианта на основните модели (Табл. 11). В обобщен вид с тях са отразени настъпилите през различните стрес периоди промени в техногенните условия при строителството на хвостохранилището, след неговата рекултивация в периода на институционален надзор и до края на прогнозния период от 100 г. – вж т. 3.1. По-конкретно, във вариантите на основните модели към съответния следващ период от експлоатацията е задавана нарастваща дебелина на филтрирания отпадък (кек). След закриване на добива действието на рекултивирания слой над кека в съответните варианти се симулира с намаляване на валежната инфилтрация.

3.2.2.4. Допълнителни варианти с отчитане на всички инженерни бариери

На базата на съставените варианти на основните модели са разработени и допълнителни варианти, в които над първата инженерна бариера (геоекран от уплътнена глина) е добавен нов моделен слой, с който да се моделира действието на хидроизолационната геомембрана (HDPE), която съгласно проекта ще се полага в долната част на долния изолиращ екран. Според техническите спецификации на този материал той е водонепроницаем, като единствено при нарушаване на неговата цялост може да пропуска течни емисии през нарушените зони. Същевременно, при задаване на нулева стойност на коефициента на филтрация в допълнителния моделен слой, задачата логично няма решение. Затова вариантите са проиграни при допускане, че коефициентът на филтрация на тази бариера е с 3 порядъка по-нисък от приетия за първата бариера от уплътнена глина, т.е. с много голям запас е прието $k = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ cm/d} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/d}$.

3.2.3. Резултати от моделните изследвания

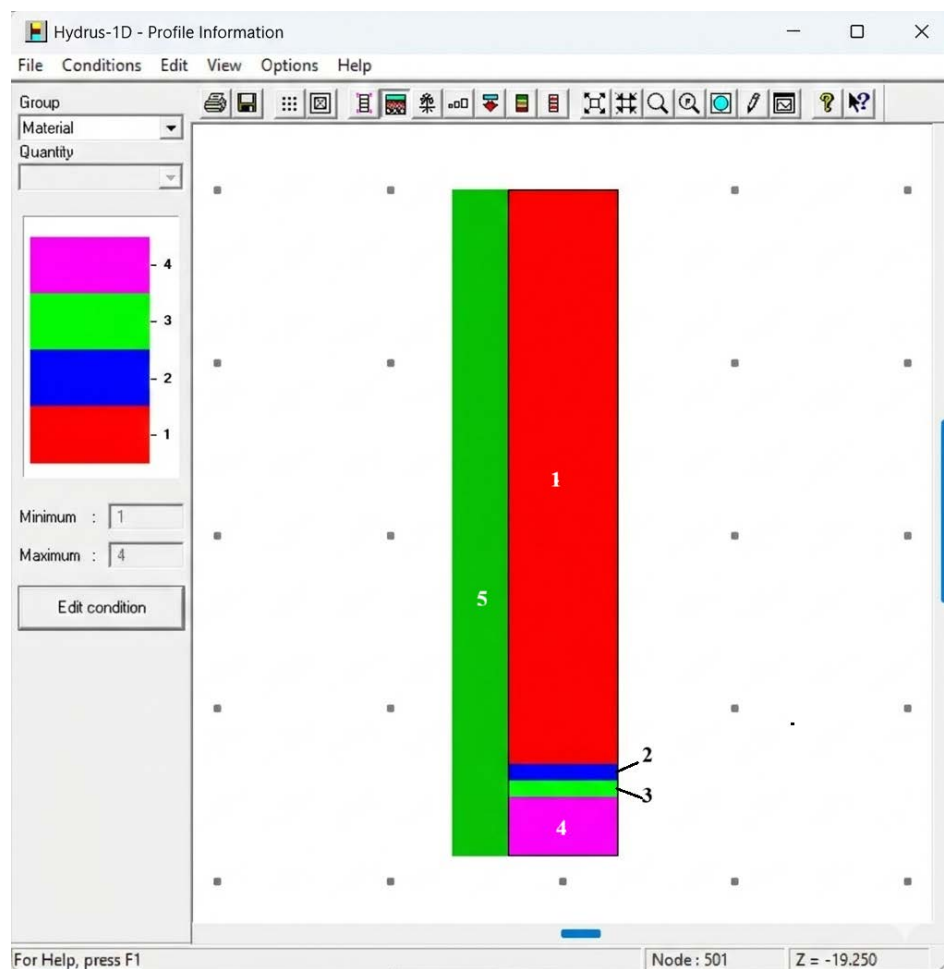
Посредством разработените варианти на основните модели в края на всеки стрес период са изчислени прогнозните скорости на инфилтрационния поток W и прогнозните концентрации на ключовите замърсители C_{SO_4} и C_{As} на границата между ненаситената и водонаситената зона под дъното на потенциалните източници. Съдържанието на SO_4 и As в достигалия до нивото на подземните води инфилтрационен поток е представено в относителни концентрации C_i към определен момент t_i спрямо началната концентрация C_0 на съответния замърсител в източника (дименсията е части от единицата). Резултати от вариантите модели са представени в Табл. 12.

Проведените изследвания с допълнителните варианти, включващи действието на хидроизолационната геомембрана, дадоха очаквани и логични резултати. Независимо от направеното консервативно допускане, че тази бариера не е абсолютно водонепроницаема, всички хидравлични модели прогнозираха нулев инфилтрационен поток през нея, а солевите модели показват пълно задържане на замърсителите над бариерата.

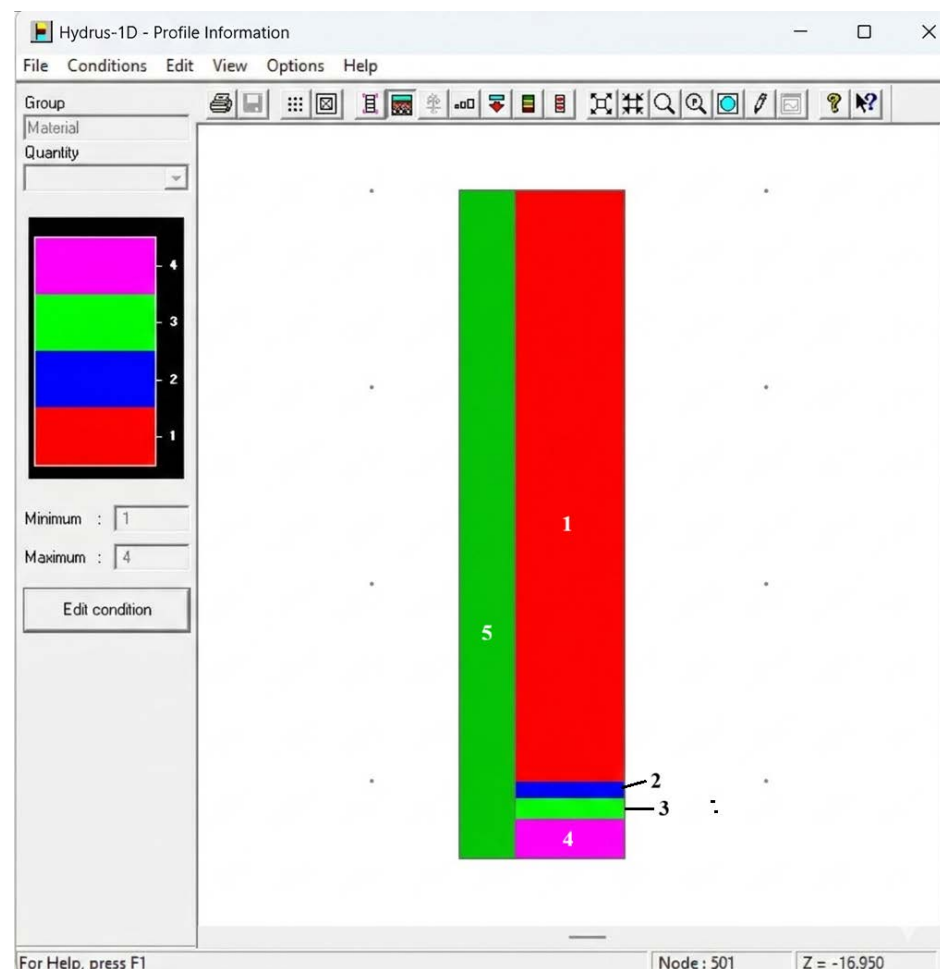
3.2.4. Анализ на резултатите от едномерните модели

На базата на получените решения може да се направи следния кратък коментар.

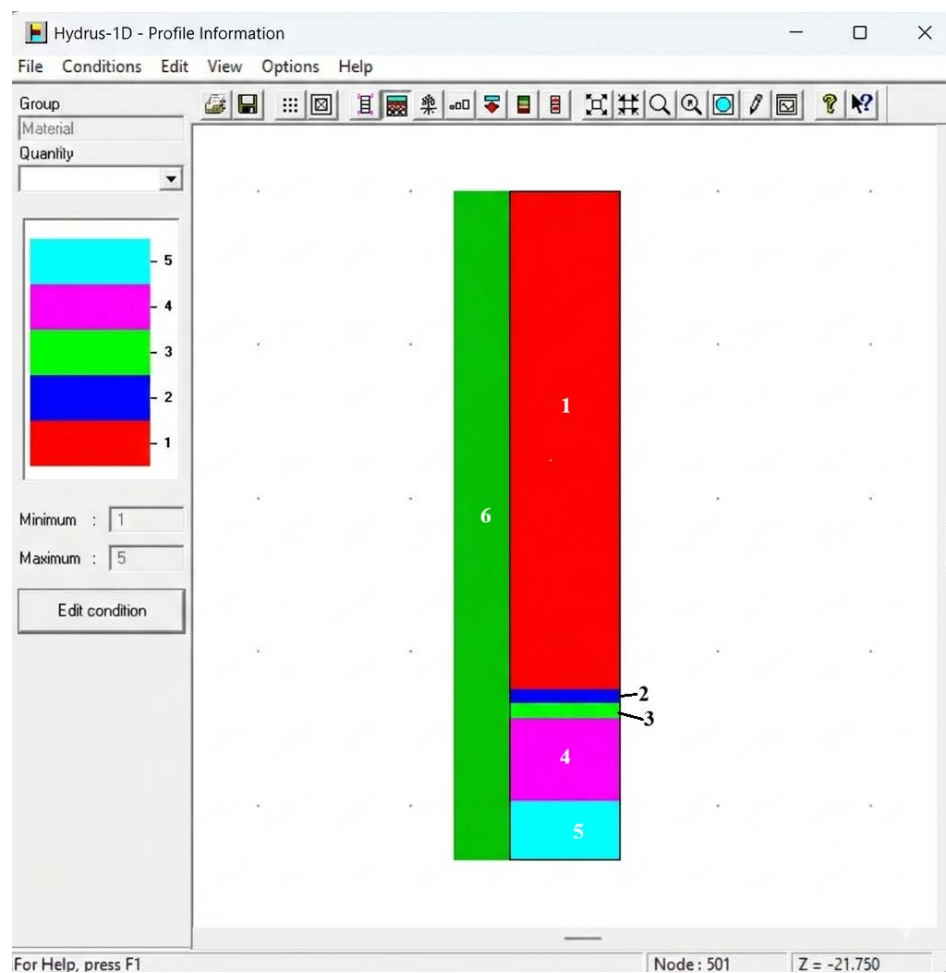
1. Зоната на аерация, геоекранът от уплътнена глина и частичното действие на долния изолиращ екран под дъното на потенциалните източници обезпечават добра защита срещу инфилтрирането на замърсени води във водонаситената зона. В количествен аспект това твърдение се базира на следните резултати от моделните изследвания:
 - Скоростта на инфилтрационния поток е сравнително по-висока по време на експлоатацията на хвостохранилището – в диапазона между $1,0 \cdot 10^{-6}$ и $1,6 \cdot 10^{-4}$ m/d, средно около $6,1 \cdot 10^{-5}$ m/d. След прекратяване на добива и рекултивирането на терена, инфилтрацията под дъното на източниците рязко намалява с 1-2 порядъка до стойности от $5,0 \cdot 10^{-8}$ до $6,9 \cdot 10^{-6}$ m/d, средно $2,7 \cdot 10^{-6}$ m/d. В случая се наблюдава едно реално „запечатване“ на застата от източници площ, тъй като посочените стойности са многократно по-ниски от скоростта на валежната инфилтрация в естествени условия ($W = 1,04 \cdot 10^{-4}$ m/d).
 - Същевременно, заедно с инфилтрационния поток в подземните води е възможно да проникне ограничено количество сулфатни йони (SO_4), чиято относителна концентрация C_{SO_4} по време на експлоатацията ще е от 0,00 до 0,75. Впоследствие, след рекултивацията C_{SO_4} ще намалее до стойности $1,9 \cdot 10^{-5}$ – $3,3 \cdot 10^{-2}$, средно около $1,4 \cdot 10^{-2}$, а в следващите 10 г. или след края на институционалния надзор ще е съвсем незначителна – от $3,9 \cdot 10^{-7}$ до $5,1 \cdot 10^{-4}$, средно – $2 \cdot 10^{-4}$.
 - Съвсем ограничени са и възможностите за навлизане на As в подземните води. Единствено три от многобройните моделни варианти прогнозираха инцидентни пробиви по профили IG63 и IG55 през втората половина на експлоатацията и малко след прекратяване на добива. Несъмнено, тези резултати нямат особено практическо значение предвид факта, че прогнозните стойности на относителната концентрация на As в тези пунктове са нищожни – между $1,4 \cdot 10^{-8}$ и $1,2 \cdot 10^{-12}$.
2. Поставянето на хидроизолационна геомембрана (HDPE) в основата на долния изолиращ екран напълно ще възпрепятства течни емисии под дъното потенциалните източници по време на експлоатацията на съоръженията и до края на прогнозния период от 100 години. Този извод се базира на резултатите от моделните варианти с отчитане защитното действие на всички инженерни бариери, които прогнозираха пълно задържане инфилтрационния поток и на съдържащите се в него замърсители.



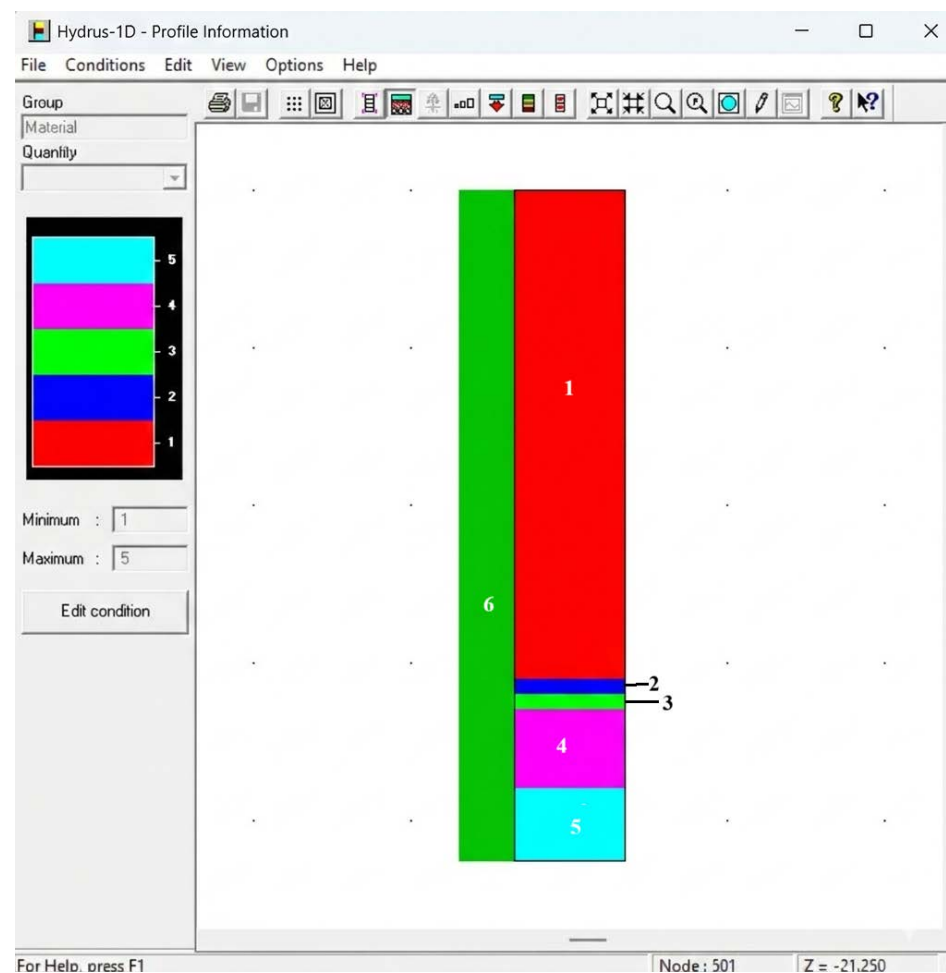
Фиг. 19. Модел M1-1D_IG18. Моделни слоеве в профил IG18.
 1 - филтриран отпадък (кек); 2 - долен изолиращ екран (ДИЕ);
 3 - геоекран от уплътнена глина; 4 - делувиялно-пролувиални глина;
 5 - дискредитизационна (нодална) мрежа



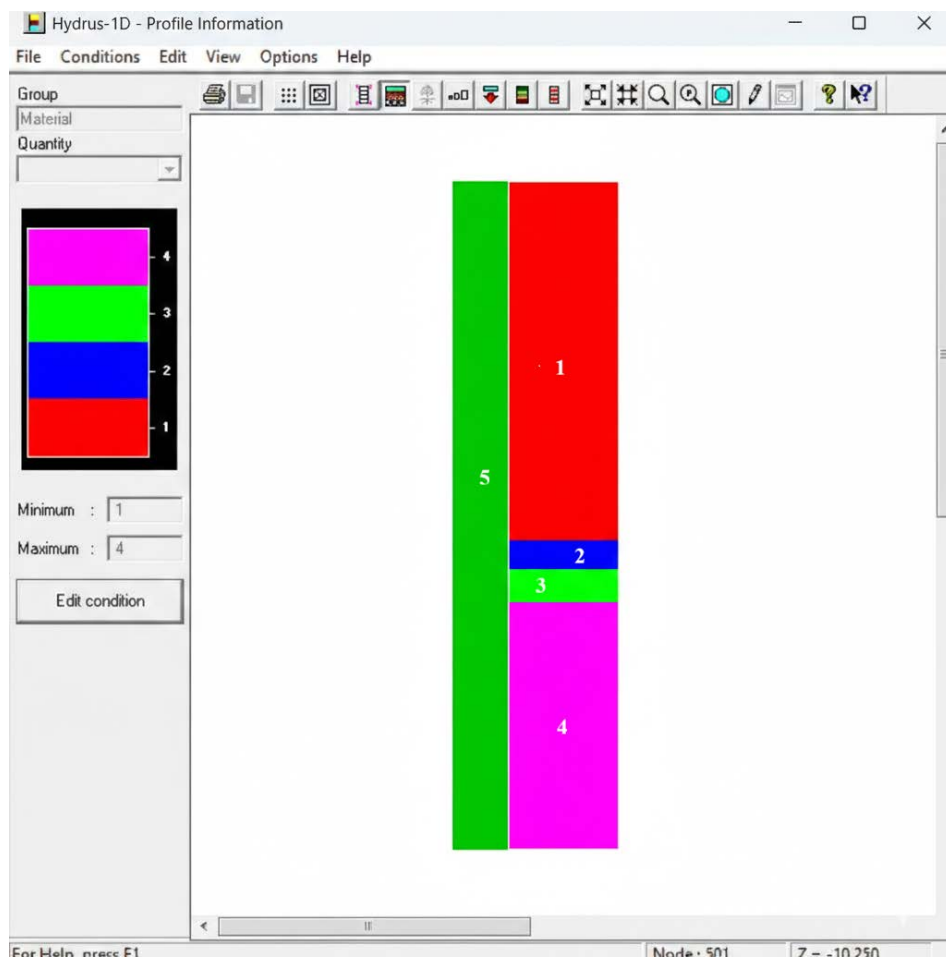
Фиг. 20. Модел M2-1D_IG54. Моделни слоеве в профил IG54.
 1 - филтриран отпадък (кек); 2 - долен изолиращ екран (ДИЕ);
 3 - геоекран от уплътнена глина; 4 - делувиялно-пролувиални глина;
 5 - дискредитизационна (нодална) мрежа



Фиг. 21. Модел M3-1D_IG06. Моделни слоеве в профил IG06.
 1 - филтриран отпадък (кек); 2 - долен изолиращ екран (ДИЕ);
 3 - геоекран от уплътнена глина; 4 - делувиялно-пролувиални глина;
 5 - туфи; 6 - дискредитизационна (нодална) мрежа

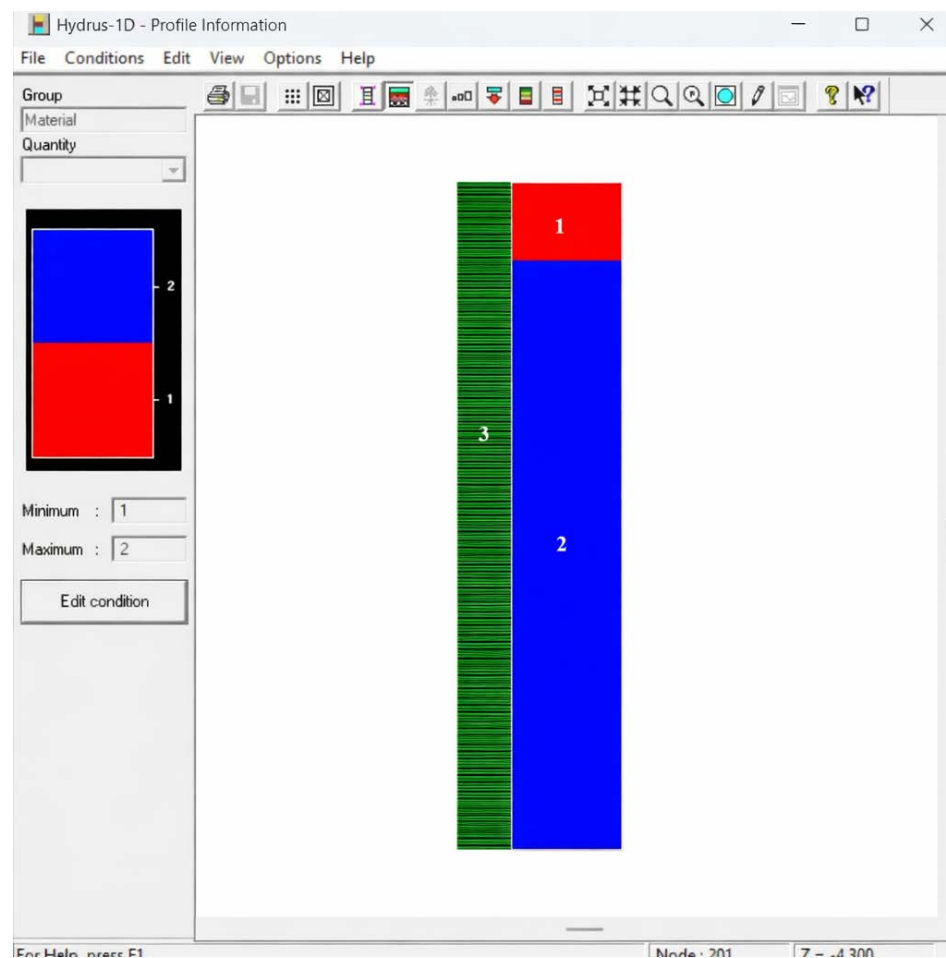


Фиг. 22. Модел M4-1D_IG55. Моделни слоеве в профил IG55.
 1 - филтриран отпадък (кек); 2 - долен изолиращ екран (ДИЕ);
 3 - геоекран от уплътнена глина; 3 - делувиялно-пролувиални глина;
 4 - туфи; 5 - дискредитизационна (нодална) мрежа



Фиг. 23. Модел M5-1D_IG03. Моделни слоеве в профил IG03.

- 1 - филтриран отпадък (кек); 2 - долен изолиращ екран (ДИЕ);
 2 - геоекран от уплътнена глина; 3 - делувиялно-пролувиални глина;
 4 - туфи; 5 - дискредитизационна (нодална) мрежа



Фиг. 24. Модел M6-1D_IG63. Моделни слоеве в профил IG63.

- 1 - геоекран от уплътнена глина; 2 - туфи; 3 - дискредитизационна
 (нодална) мрежа

Таблица 11. Данни за пространствените и времеви параметри на едномерните модели

Основен модел №	Разрез по сондажен профил №	Вариант на основния модел №	Стрес период	Времеви интервал, у	Изчислително време, у	Дебелина на кека, m	Рекултивиран слой над кека
M1-1D_IG18	IG18	M1-1D_IG18-v1	1	0-4	4	13,3	не
		M1-1D_IG18-v2	2, 3	4-8	4	16,6	
		M1-1D_IG18-v3	4	8-18	10		да
		M1-1D_IG18-v4	5	18-100	82		
M2-1D_IG54	IG54	M2-1D_IG54-v1	1	0-4	4	7,5	не
		M2-1D_IG54-v2	2, 3	4-8	4	15,0	
		M2-1D_IG54-v3	4	8-18	10		да
		M2-1D_IG54-v4	5	18-100	82		
M3-1D_IG06	IG06	M3-1D_IG06-v1	2	4-6	2	5,1	не
		M3-1D_IG06-v2	3	6-8	4	13,1	
		M3-1D_IG06-v3	4	8-18	10	16,2	да
		M3-1D_IG06-v4	5	18-100	82		
M4-1D_IG55	IG55	M4-1D_IG06-v1	2	4-6	2	5,0	не
		M4-1D_IG06-v2	3	6-8	4	12,3	
		M4-1D_IG06-v3	4	8-18	10	15,5	да
		M4-1D_IG06-v4	5	18-100	82		
M5-1D_IG03	IG03	M5-1D_IG03-v1	2	6-8	2	2,3	не
		M5-1D_IG03-v2	4	8-18	10	5,5	да
		M5-1D_IG03-v3	5	18-100	82		
M6-1D_IG63	IG63	M6-1D_IG63-v1	1	0-8	8	не	не
			2				
			3				
		M6-1D_IG63-v2	4	8-18	10		
		M6-1D_IG63-v3	5	18-100	82		

Таблица 12. Резултати от едномерните модели. Скорост на инфилтрационния поток W и концентрация на ключовите замърсители в него C_{SO4} и C_{As} на границата между ненаситената и водонаситената зона.

Основен модел №	Вариант на основния модел №	Стрес период	Времеви интервал, у	Скорост на инфилтрационния поток W , m/d	Концентрация на ключовите замърсители	
					C_{SO4} , -	C_{As} , -
M1-1D_IG18	M1-1D_IG18-v1	1	0-2	1,01E-06	3,35E-06	0,00E+00
	M1-1D_IG18-v2	2, 3	4-8	1,37E-04	8,60E-03	0,00E+00
					6,68E-01	0,00E+00
	M1-1D_IG18-v3	4	8-18	6,85E-06	1,97E-02	0,00E+00
	M1-1D_IG18-v4	5	18-100	8,48E-07	3,49E-04	0,00E+00
M2-1D_IG54	M2-1D_IG54-v1	1	0-4	2,19E-06	2,70E-05	0,00E+00
	M2-1D_IG54-v2	2-3	4-8	1,33E-04	3,92E-03	8,32E-10
					7,70E-02	6,54E-09
	M2-1D_IG54-v3	4	8-18	6,48E-06	3,15E-02	4,3E-011
	M2-1D_IG54-v4	5	18-100	5,21E-07	1,23E-04	0,00E+00
M3-1D_IG06	M3-1D_IG06-v1	2	4-6	3,59E-05	0,00E+00	0,00E+00
	M3-1D_IG06-v2	3	6-8	4,41E-05	1,48E-03	0,00E+00
	M3-1D_IG06-v3	4	8-18	4,52E-06	4,10E-04	0,00E+00
	M3-1D_IG06-v4	5	18-100	3,06E-07	1,19E-05	0,00E+00

Таблица 12 (продължение). Резултати от едномерните модели. Скорост на инфилтрационния поток W и концентрация на ключовите замърсители в него C_{SO4} и C_{As} на границата между ненаситената и водонаситената зона.

Основен модел №	Вариант на основния модел №	Стрес период	Времеви интервал, у	Скорост на инфилтрационния поток W , m/d	Концентрация на ключовите замърсители	
					C_{SO4} , -	C_{As} , -
M4-1D_IG55	M4-1D_IG55-v1	2	4-6	3,67E-05	0,00E+00	0,00E+00
	M4-1D_IG55-v2	3	6-8	4,47E-05	2,91E-03	0,00E+00
	M4-1D_IG55-v3	4	8-18	4,58E-06	2,62E-05	0,00E+00
	M4-1D_IG55-v4	5	18-100	1,08E-06	0,00E+00	0,00E+00
M5-1D_IG03	M5-1D_IG03-v1	3	6-8	1,64E-05	0,00E+00	0,00E+00
	M5-1D_IG03-v2	4	8-18	1,97E-06	1,87E-05	0,00E+00
	M5-1D_IG03-v3	5	18-100	5,01E-08	3,92E-07	0,00E+00
M6-1D_IG63	M6-1D_IG63-v1	1	0-8	1,56E-04	7,80E-03	0,00E+00
		2			8,10E-02	2,81E-09
		3			7,52E-01	1,37E-08
	M6-1D_IG63-v2	4	8-18	5,33E-05	3,34E-02	1,21E-12
	M6-1D_IG63-v3	5	18-100	2,48E-06	5,11E-04	0,00E+00

3.3. Тримерни (3D) прогнозни модели на възможното замърсяване на подземните и повърхностните води

3.3.1. Основен филтрационен 3D модел

3.3.1.1. Методика и инструменти

Основният филтрационен 3D модел е съставен посредством една от най-известните компютърни програми за моделиране на хидродинамични явления и процеси – Modflow. Тя е съвместна разработка на Геоложката служба на САЩ (USGS) и Агенцията за защита на околната среда на САЩ (EPA).

Използваната изчислителна процедура в Modflow се свежда до числено решаване (по метода на крайните разлики) на частното диференциално уравнение, описващо тримерното движение на подземни води (Javandel et al., 1984; и др.):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

където: k_x , k_y , и k_z – коефициент на филтрация в направление на координатните оси x , y и z , ($L T^{-1}$); h – напор (L); W – разход на единица обем, отразяващ приток/отток от стоковете/източниците във филтрационната област (T^{-1}); S_s – коефициент на специфичното еластично водоотдаване (L^{-1}); t – време (T).

Непрекъснатата среда, описвана с уравнение (1), се заменя с краен брой дискретни в пространството и времето точки, а частните производни се заменят с изрази, изчислени въз основа на различията в стойностите на напора в тези точки. Този процес води до система линейни уравнения, чието решаване дава стойностите за напора в определени точки и към определени моменти от време. Получените стойности представляват апроксимация на променящото се във времето разпределение на напорите, които би дало аналитичното решение на частното диференциално уравнение на филтрацията.

При композиране на тримерните числени модели разглежданата част от подповърхностното пространство се дискретизира пространствено чрез мрежа от блокове (клетки), които се описват от гледна точка на редове, колони и пластове. В границите на всяка клетка хидродинамичните свойства са постоянни. Клетките могат да бъдат активни и неактивни. В активните клетки напорът е променлив (изчислява се за всяка времева стъпка) или постоянен, а в неактивните клетки потокът е нулев. По този начин хидрогеоложките единици от различен ранг могат да бъдат моделирани като тримерни обекти.

В нестационарните математически модели общото време за симулация се разделя на времеви интервали – стрес периоди и времеви стъпки. Стрес периодите са времеви интервали, в чиито граници външните въздействия върху водоносния комплекс (реки, дренажи, кладенци, инфилтрационно подхранване и др.) остават постоянни. Всеки стрес период се разделя на времеви стъпки, с геометрично нарастваща продължителност.

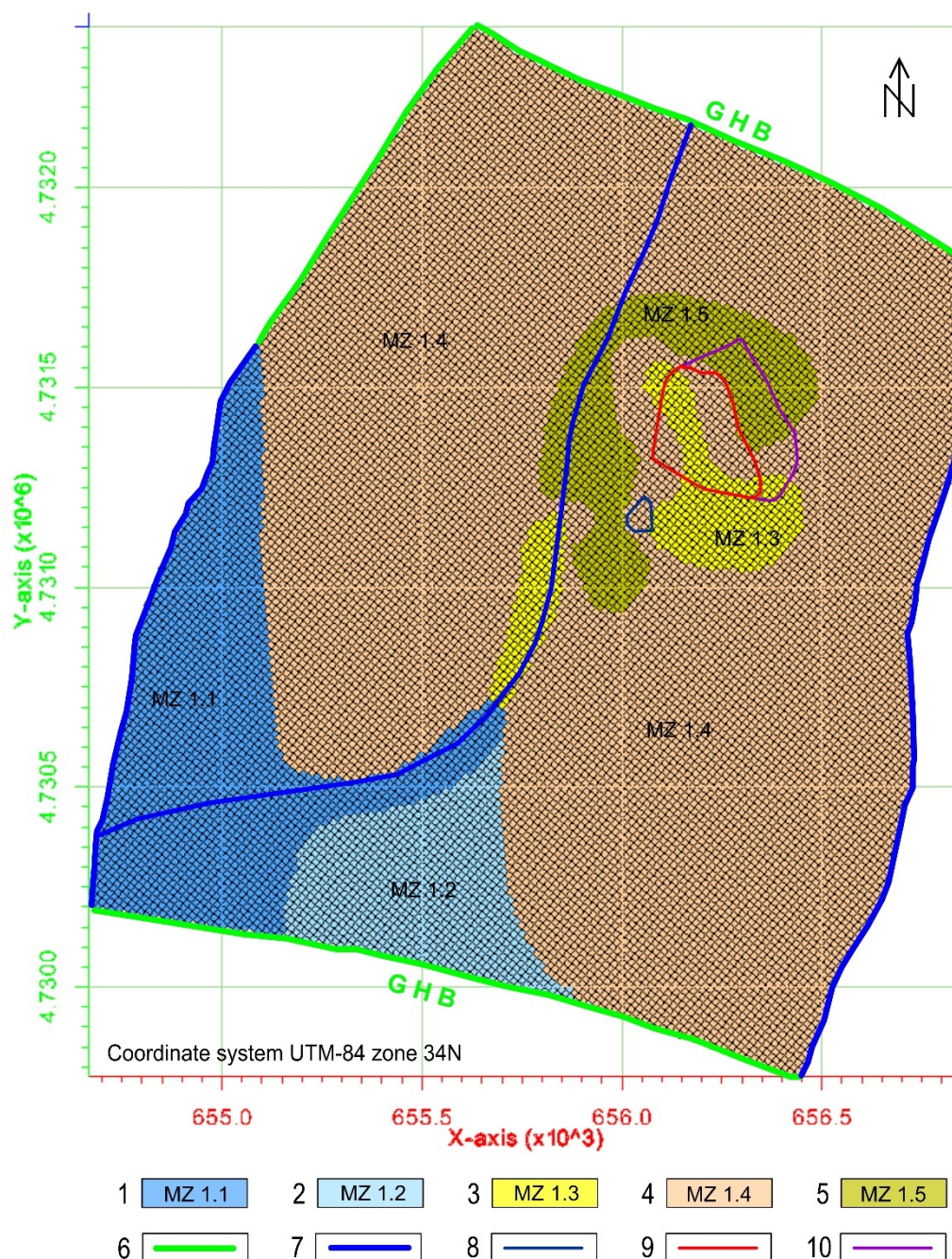
Външните въздействия в моделната област, като кладенци, дренажи, реки, зони на подхранване, противифилтрационни бариери и водоприток от съседни водоносни хоризонти също могат да бъдат симулирани. Граничните условия се задават с функцията на напора, разхода и връзката между тях.

Повече подробности относно използвания математически апарат и особеностите при използването на Modflow са подробно описани в Anderson et al., 2015; McDonald and Harbaugh, 1988; Harbaugh and McDonald, 1996; Harbaugh et. al., 2000, Harbaugh, 2005; Стоянов, 2019 и др.

3.3.1.2. Композиране на основния модел FMB3D

Основните позиции и входни параметри при композирането на модел FMB3D са:

- Моделът е съставен съобразно допусканията, представени в концептуалния модел и програмния пакет Modflow.
- Площта на моделната област е около 3,8 km². Пространствената дискретизация е направена посредством равномерна ортогонална мрежа (Фиг. 25 и Фиг. 26).
- Равномерната ортогонална мрежа съдържа 185 реда, 162 колони и 2 моделни пласта (ML1 и ML2) – Фиг. 25, като в моделен пласт ML1 са детерминирани и 5 моделни зони – MZ 1.1, MZ 1.2, MZ 1.3, MZ 1.4 и MZ 1.5. Моделните зони относително точно симулират пространственото разпространение на отделените хидрогеоложки единици от различен ранг (Табл. 13).
- Релефът и хипсометричните нива на ограничителните повърхнини, т.нар. долница и горница на моделните пластове и зони са съобразени с морфологичните особености на земната повърхност и пространствените граници на моделираните хидрогеоложки единици (Фиг. 26).
- Моделните зони са зададени като условно еднородни с приетите в концептуалния модел изчислителни стойности на хидродинамичните свойства – коефициент на филтрация k и коефициент на водоотдаване S (Табл. 5 и Табл. 13). За коефициента на филтрация k е прието и широко практикуваното в математическото моделиране съотношение $k_x = k_y = 10k_z$.
- Моделът е нестационарен. Времето за симулация 100 г. е разделено на 5 стрес периода с продължителност съответно 4, 2, 2, 10 и 82 г. Първите три стрес периода симулират трите етапа на изграждане на хвостохранилището, четвъртият симулира периода на планирания 10-годишен институционален мониторинг след прекратяване на добива, а петият включва последния период от дългосрочната прогноза, за който все още няма указан режим на управление на обекта.
- Регионалният поток е моделиран с разход по външните граници на моделната област по схемата General Head Boundary (GHB). Проводимостта по границата е изчислена съобразно дебелината и коефициента на филтрация на моделния пласт или моделната зона, където попада съответната моделна клетка.
- Повърхностните потоци с постоянен или временен отток – р. Брезнишка, р. Дабовица и дере Дълбоки дол са симулирани като тримерни обекти със съответната геометрия и хидравлични характеристики. Зададени са в пласт ML 1 с гранично условие River.
- Инфилтрационното подхранване от валежите е зададено във всички клетки на пласт ML 1 с гранично условие Recharge, съобразно направеното в концептуалния модел зониране (вж. т. 2.5.2). Началните стойности за скоростта на инфилтрацията W са приети съобразно представените в Табл. 6 данни от направените изчисления за двете зони с различна водопропускливост на приповърхностния слой.
- Инфилтрационният поток е зададен съобразно изчисленията с едномерните модели за всеки стрес период стойности на скоростта на инфилтрация W_p под дъното на дефинираните площни източници на замърсяване в границите на хвостохранилището и контактния водоем – Табл. 14.
- Проучвателните сондажи, в които данни за естествените нива на подземните води са въведени като точки за наблюдение на напорите с гранично условие Observation Point.



Фиг. 25. Дискретизация на моделната област в план. Моделни зони и гранични условия.

1 – Моделна зона MZ 1.1 (alQ^{aa}); 2 – Моделна зона MZ 1.2 ($pr-dlQ^{aa}$); 3 – Моделна зона MZ 1.3 (HGU 1.1); 4 – Моделна зона MZ 1.4 (HGU 1.2); 5 – Моделна зона MZ 1.5 (HGU 1.3); 6 – Гранично условие General Head Boundary (GHB); 7 – Гранично условие River; Потенциални източници: 8 – Контактен водоем; 9 – Хвостохранилище - Етап 1; 10 – Хвостохранилище - Етап 2.

3.3.1.3. Калибриране на модела

Калибрацията на основния филтрационен модел FMB3D е направена спрямо регистрираните през месец септември 2023 г. водни нива в проучвателни сондажи IG53, IG54, IG55, IG56, IG57, IG58, IG59, IG61, IG62, IG63, IG64, IG65, IG67, IG68, IG69 и IG70. (Табл. 15). При калибрационната процедура в тесни граници са варираны стойностите на коефициента на филтрация k , скоростта на инфилтрация W , водните стоежи h и проводимостта C по външните граници и реките.

Достоверността на моделното решение е установена чрез проследяване разликата Δ_{obs} между изчислените и измерените стойности на напора в наблюдателните пунктове. Резултатите от изпълнените калибрационни процедури са представени на Фиг. 27. Полученото добро съответствие между фактическата и моделната пиезометрия е свидетелство за устойчивостта на основния филтрационен модел.

3.3.1.4. Моделни решения – структура на подземния поток и воден баланс

Структура на подземния поток

Определената с основния филтрационен модел FMB3D структура на подземния поток е дадена на Фиг. 28 и Фиг. 29. Наблюдаваните аномалии в пиезометричната картина са резултат на особеностите на релеф, ерозионния базис на суходолията и наличието на зони с големи различия във водопропускливостта. Представеното моделно решение показва следните закономерности в структурата на подземния поток и хидродинамичните условия за пренос на вещество в района на изследвания обект:

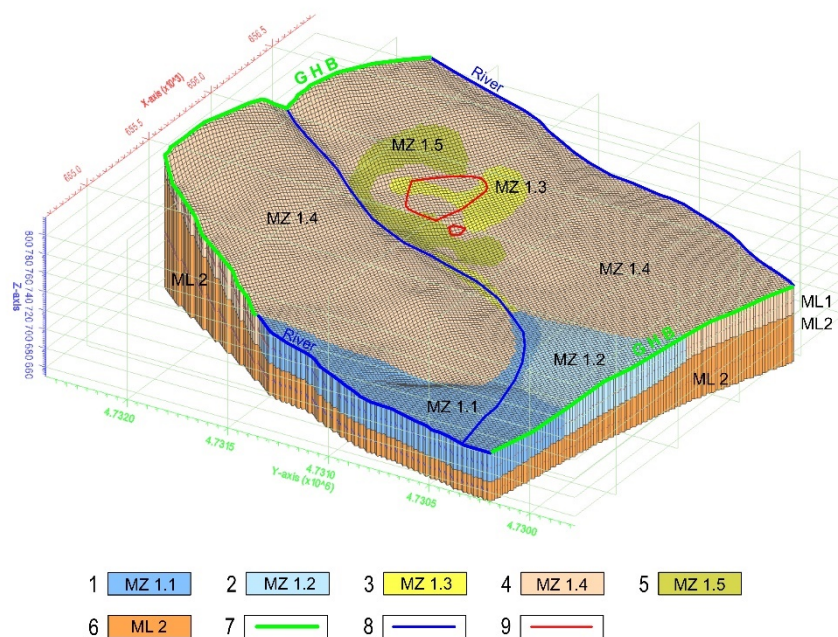
- Генералната посока на подземните води е ориентирана ЮЗ-З – към р. Брезнишка.
- Хидравличният наклон е най-висок в района на потенциалните източници – около 0,075. В югозападна посока и по направлението на Дълбоки дол намалява до 0,04-0,05. След навлизането на подземния поток в терасата на р. Брезнишка неговият градиент рязко спада до 0,0065 поради много по-голямата водопропускливост на алувиалните наслаги от тази в горнокредния скален комплекс.
- Скоростта на подземния поток е най-висока в приповърхностната част на скалния масив и терасата на р. Брезнишка. Това създава условия за по-активен водообмен и възможен обмен на вещество между подземните и повърхностните води. В подълбоките части на скалния масив водообменът и конвективният пренос ще са много по-ограничени вследствие на доста по-ниската водопропускливост на скалите.

Специфичната структура на подземния поток създава много благоприятни условия генерираните от потенциалните източници замърсени води да се дренират в Дълбоки дол, след което да навлязат в речната тераса и оттам подземно да се оттекат в р. Брезнишка.

Воден баланс

Съставеният с модел FMB3D воден баланс на горния водопропусклив пласт (HGU-1), в който са разположени потенциалните източници, е представен в Табл. 16. Сравнителният анализ на тези данни дава основание за следните количествени оценки на естествените водни ресурси и условията за замърсяване на тази хидрогеоложка единица:

- Общото количество на циркулиращите в границите на HGU-1 подземни води е 7 L/s.
- Около 62 % от естествените водни ресурси се формират от инфилтрация на падналите валежи, други 25 % са за сметка на постъпващия по северната граница подземен поток и приблизително 12 % постъпва от р. Дабовица. Останалата съвсем незначителна част (около 1 %) идва от долния слабо водопропусклив пласт (HGU-2).
- Основното дрениране на подземните води (около 55 %) се реализира в алувиалния водоносен хоризонт (терасата на р. Конска) и свързания с нея пролувиално-делувиален водоносен хоризонт. Друга по-малка част (приблизително 23 %) се оттича през южната граница на модела. Малко над 6 % се дренира в долния слабопротупусклив пласт и около 5 % се оттича към р. Дабовица.
- Дрениращият се подземен поток в близкото до потенциалните източници дере Дълбоки дол е в размер на 0,74 L/s, което е 10 % от общия естествен ресурс в горния водопротупусклив пласт.



Фиг. 26. Пространствена дискретизация на моделната област. Моделни пластове и зони. Гранични условия.

1 – Моделна зона MZ 1.1 (alQ^{aq}); 2 – Моделна зона MZ 1.2 ($pr-dlQ^{aq}$); 3 – Моделна зона MZ 1.3 (HGU 1.1); 4 – Моделна зона MZ 1.4 (HGU 1.2); 5 – Моделна зона MZ 1.5 (HGU 1.3); 6 – Моделна зона MZ2.2 (HGU 2); 7 – Гранично условие General Head Boundary (GHB); 8 – Гранично условие River; 9 – Потенциални източници – хвостохранилище и контактен водоём.

Таблица 13. Модел FMB3D. Връзка между хидрогеоложките и моделните единици.

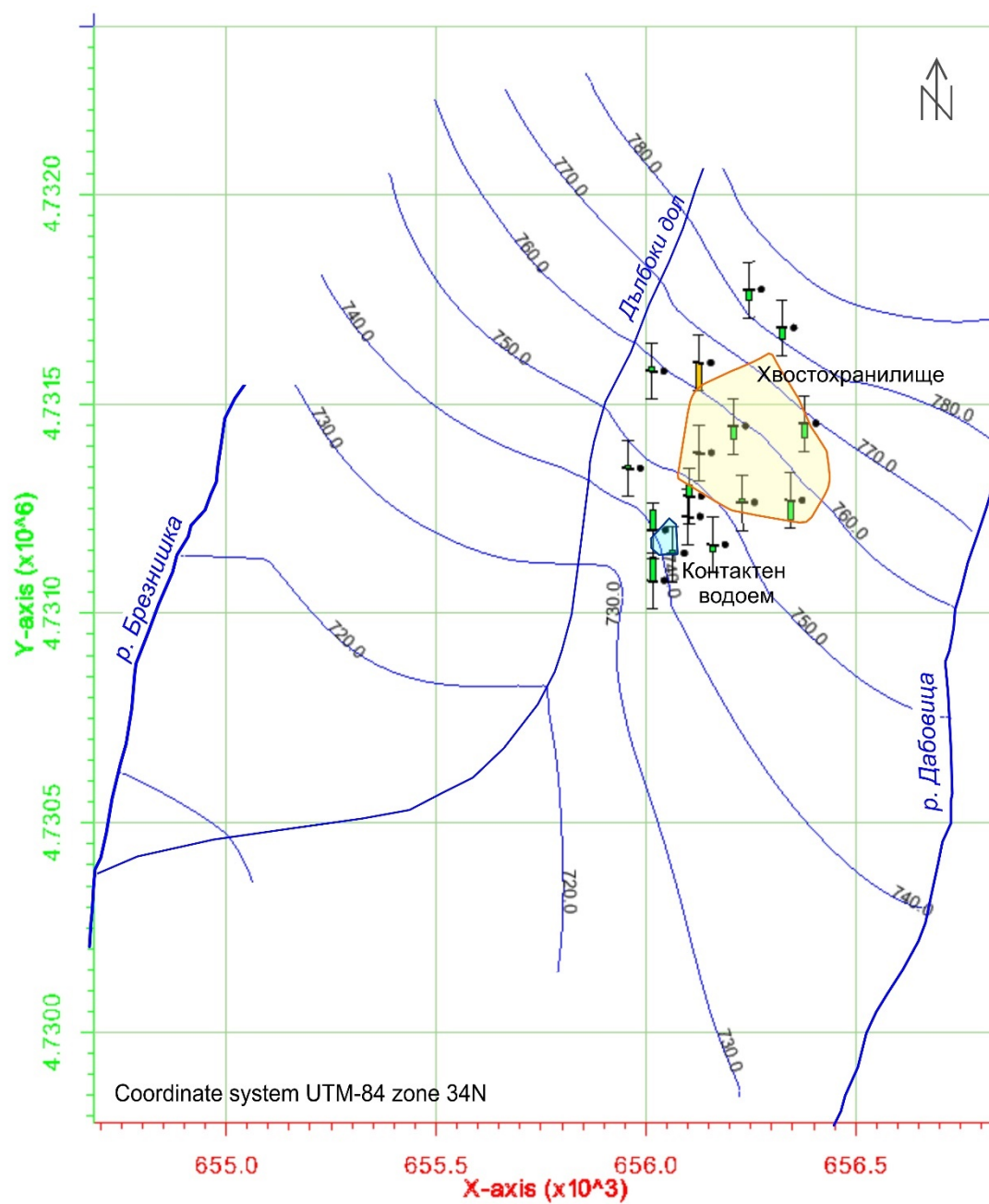
Хидрогеоложки единици			Моделни единици	
Ранг 1	Ранг 2	Ранг 3	Моделен пласт	Моделна зона
Алувиален водоносен хоризонт (alQ^{aq})			ML 1	MZ 1.1
Пролувиално-делувиален водоносен хоризонт ($pr-dlQ^{aq}$)				MZ 1.2
Слабо водоносен порово-пукнатинен комплекс (K_2^{cmx})	Горен водопропусклив пласт (HGU-1)	Проницаема зона (HGU-1.1)		MZ 1.3
		Средно проницаема зона (HGU-1.2)		MZ 1.4
		Слабо проницаема зона (HGU-1.3)		MZ 1.5
	Долен слабо водопропусклив пласт (HGU-2)		ML 2	

Таблица 14. Входни данни за тримерните модели – скорост на инфилтрационния поток W_p и концентрация на ключовите замърсители в него C_{SO4} и C_{As} в източниците

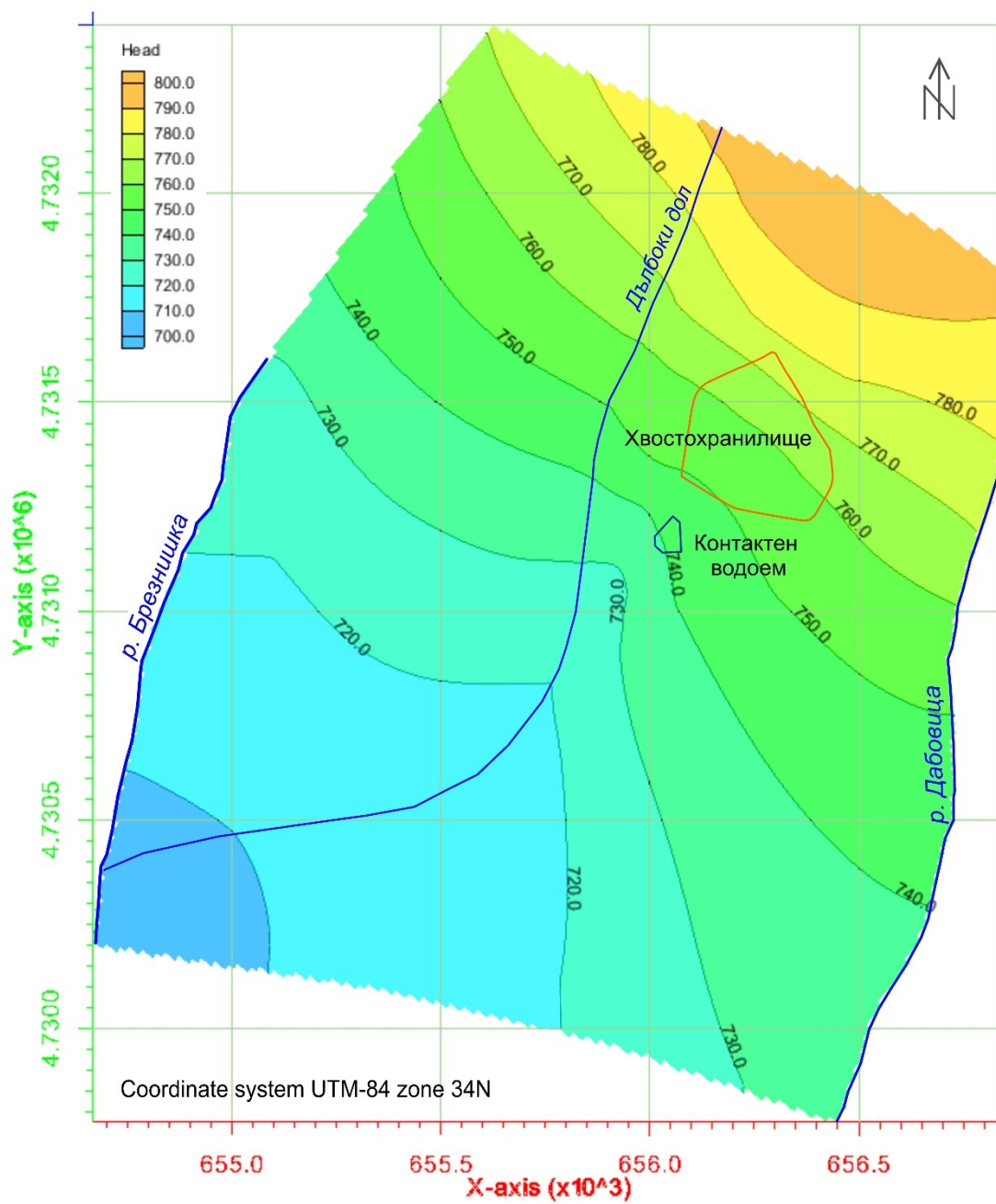
Стрес период	Изчислително време, у	Времеви интервал, у	Площен източник	W_p , m/d	C_{SO4} , -	C_{As} , -
1	4	0-4	Контактен водоем	1,56E-04	7,80E-03	0,00E+00
			Хвостохранилище - етап 1	1,60E-06	2,70E-05	0,00E+00
2	2	4-6	Контактен водоем	1,56E-04	8,10E-02	2,81E-09
			Хвостохранилище - етап 1	1,35E-04	8,60E-03	8,32E-10
			Хвостохранилище - етап 2	3,63E-05	0,00E+00	0,00E+00
3	2	6-8	Контактен водоем	1,56E-04	7,52E-01	1,37E-08
			Хвостохранилище - етап 1-2	1,51E-04	6,68E-01	6,54E-09
4	10	8-18	Контактен водоем	5,33E-05	3,34E-02	1,21E-12
			Хвостохранилище	4,88E-06	3,15E-02	4,30E-11
5	82	18-100	Контактен водоем	3,03E-06	5,11E-04	0,00E+00
			Хвостохранилище	5,61E-07	3,49E-04	0,00E+00

Таблица 15. Коти на статичните водни нива в проучвателните сондажи към месец септември 2023 г.

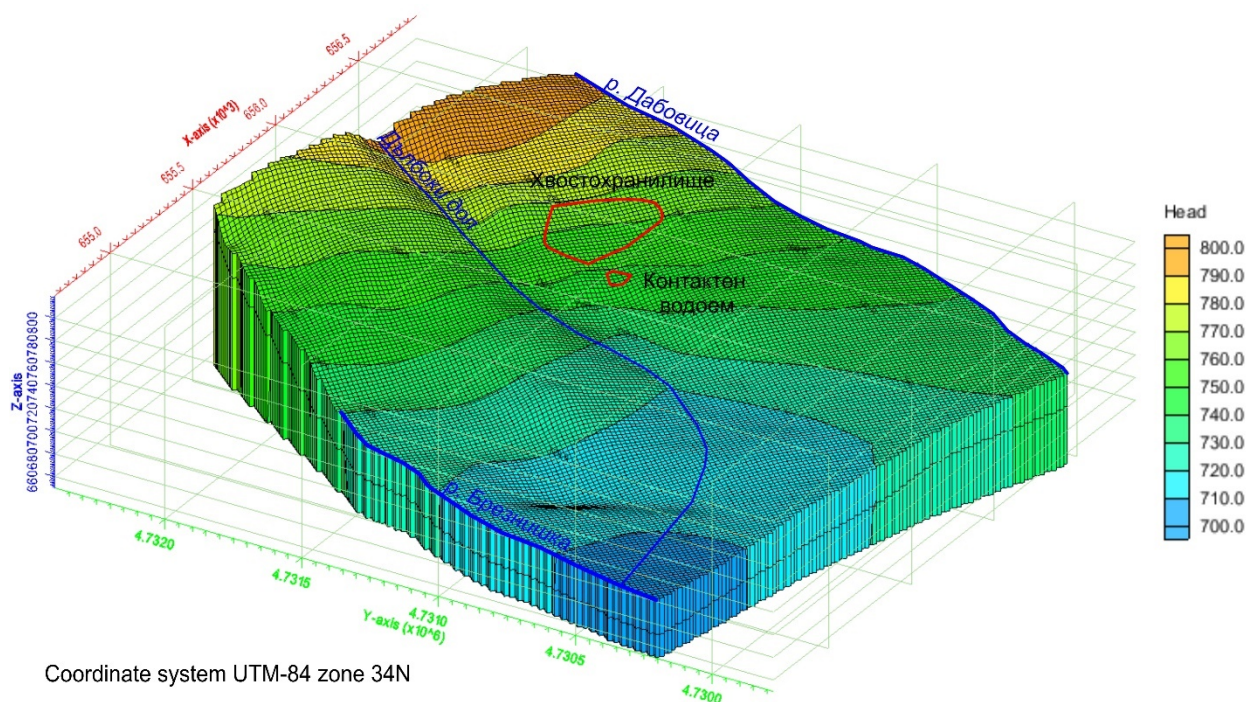
Проучвателен сондаж №	Координатна система UTM-84, зона 34N		Кота СВН, m
	X, m	Y, m	
IG53	656043,020	4731577,914	758,77
IG54	656237,714	4731446,947	762,16
IG55	656372,303	4731270,060	761,62
IG56	656352,733	4731681,679	785,74
IG57	656258,825	4731265,067	752,65
IG58	655986,935	4731346,312	746,99
IG59	656043,759	4731078,618	734,77
IG61	656405,729	4731453,282	772,03
IG62	656091,575	4731143,436	742,65
IG63	656046,169	4731199,012	738,23
IG64	656188,880	4731164,184	748,99
IG65	656129,264	4731231,130	747,06
IG67	656132,573	4731279,825	746,92
IG68	656155,995	4731383,405	755,04
IG69	656274,875	4731772,889	785,76
IG70	656154,670	4731597,857	769,74



Фиг. 27. Модел FMB3D. Резултати от калибрацията на основния филтрационен 3D модел.



Фиг. 28. Модел FMB3D. Двумерна структура на подземния поток в приповърхностната част на подповърхностното пространство до дълбочина 20-25 m.



Фиг. 29. Модел FMB3D. Тримерна структура на подземния поток в изследваната част на подповерхностното пространство.

Таблица 16. Модел FMB3D. Резултати от съставения воден баланс в обхвата на горния водопрониклив пласт HGU-1.

ПРИХОДНИ ЕЛЕМЕНТИ, Q_i^{in} , L/s		РАЗХОДНИ ЕЛЕМЕНТИ, Q_i^{out} , L/s	
Подземен поток от северната граница	1,72	Подземен поток през южната граница	1,59
Подхранване от р. Дабовица	0,85	Дрениране в Дълбоки дол	0,74
Подхранване от инфилтрация	4,32	Дрениране в р. Дабовица	0,35
Подхранване от долния слабо пропусклив пласт	0,12	Дрениране в долния слабо пропусклив пласт	0,43
		Дрениране към речната тераса на р. Конска и нейните притоци	3,88
Общо	7,01	Общо	6,99
Балансова грешка 0,28 % (difference)			

Резултати от съставения общ воден баланс в рамките на моделната област показва, че в алувиалния водоносен хоризонт циркулира подземен поток в размер на 65 L/s. От това следва, че при формирането на подземния воден ресурс в тази част от терасата на р. Конска и нейните притоци само 6 % са за сметка на горния водопрониклив пласт и едва 1.5 % идват от първия реципиент Дълбоки дол.

3.3.2. Миграционни 3D модели на движението на SO₄ и As

За количествена оценка и прогноза на възможното разпространение във водонаситената зона на постъпили от потенциалните източници замърсени води са разработени два миграционни тримерни модела на условията за движение на ключовите замърсители в обхвата на моделната област – MTM-SO₄ и MTM-As. С първия миграционен модел е изследвано поведението на инертните и много подвижни замърсители по примера на SO₄, а с втория – на силно сорбируемите и слабо подвижни замърсители (в това число и тежки метали) по примера на As. Посредством миграционните 3D модели се илюстрира механизмът на постъпване и движение на замърсители в подземните и повърхностните води, макар че решенията от 1D моделите убедително показваха отсъствие на реална опасност поради много ниските концентрации в инфилтрационния поток под източниците, например прогнозните стойности за As са нулеви или инцидентно между $2.81 \cdot 10^{-8}$ и $7.3 \cdot 10^{-11}$, т.е. без каквото и да било практическо значение.

Получените прогнозни решения за разпределението на относителните концентрации в подповърхностното пространство, съответно $C_{SO_4} = f(x, y, z, t)$ и $C_{As} = f(x, y, z, t)$, дават възможност да се направи и количествена оценка на риска от замърсяване в случай на много тежки аварийни ситуации или драстично неспазване на използваната технология, при което изтичащите под източниците емисии съдържат изключително високи концентрации от порядъка на няколко хиляди mg/L и повече.

3.3.2.1. Методика и инструменти

Миграционните модели MTM-SO₄ и MTM-As са разработени с компютърна програма MT3D-MS (Zheng and Wang, 1998). В нея се използва числено решение на основното диференциално уравнение, описващо преноса на вещество във водонаситена среда (Javandel et al., 1984):

$$R_f \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i c) + \frac{q_s}{n_0} c_s - \gamma \left(c + \frac{\rho_b}{n_0} \bar{c} \right) \quad (2)$$

където: c – концентрация на замърсителите (разтвореното вещество) в подземните води, [ML⁻³]; $\bar{c}$ – концентрация на замърсителите, сорбрани от средата, [MM⁻¹]; c_s – концентрация на замърсителите във влизащите/напускащите моделната област водни количества, [ML⁻³]; u_i – действителна скорост на подземните води, [LT⁻¹]; q_s – приток/отток от различни източници/стокове, [T⁻¹]; t – време, [T]; x_i – разстояние по съответната координатна ос, [L]; D_{ij} – тензор на хидродинамична дисперсия, [L²T⁻¹]; n_0 – активна порестост; ρ_b – обемна плътност, [ML⁻³]; γ – коефициент на необратимо елиминиране (разграждане и разпад), [T⁻¹]; R_f – забавящ фактор, който се определя от израза.

$$R_f = 1 + \frac{\rho_b}{n_0} \frac{\partial \bar{c}}{\partial c} \quad (3)$$

При условие, че процесите на обратимо елиминиране протичат по линейна изотерма на Henry, забавящият фактор R_f се определя по формулата

$$n_s = n_0 + \rho_b K_D = n_0 + \kappa = n_0 R_f, \quad (4)$$

където: k – обобщен параметър на равновесната сорбция, p_s – сорбционна порестост, p_0 – активна порестост, K_D – коефициент на разпределение [$L^{-3}M$].

Основното уравнение (2) описва движението на замърсителите при отчитане на конвективния пренос, механичната дисперсия, молекулярната дифузия, обратимото елиминиране (сорбция/десорбция), необратимото елиминиране (утаяване, биодеградация, радиоактивен разпад) и смесване.

Компютърната програма MT3D-MS следва използваната в Modflow концепция за пространствена и времева дискретизация. При композирането на миграционните модели като база се използват получените с Modflow решения за структурата на подземния поток, респ. за разпределението на напорите, разходите и скоростите в съответните стрес периоди.

В миграционните модели върху концентрационното поле е възможно да се симулира действието на външни за системата източници/стокове (реки, дренажи, кладенци, резервоари, инфилтрационно подхранване и др.), в това число и замърсявания от точкови, линейни и площни източници с различно по продължителност и интензивност действие.

Повече подробности относно използвания математически апарат и особеностите при използването на MT3D-MS са подробно описани в Zheng and Bennet, 1995; Zheng and Wang, 1999; Anderson et al., 2015; Стоянов, 2019; и други.

3.3.2.2. Композиране на миграционните модели

Използваният подход и входни данни, при които са съставени миграционните модели MTM-SO₄ и MTM-As са следните:

- Моделите са разработен с програма MT3D-MS. Като входни данни са използвани получените с модел FMB3D решения за пространственото разпределение на напорите, градиентите, скоростите и водните количества.
- Изчислителната схема отчита конвективния пренос, обратимото елиминиране (сорбция-десорбция), механичната дисперсия, молекулярната дифузия и смесването.
- В моделните зони са зададени приетите за съответната хидрогеоложка единица стойности на активната порестост p_0 , надлъжната дисперсивност α_L и коефициента на молекулярна дифузия D_m – Табл. 5.
- Напречната хоризонтална и вертикална дисперсивност (α_{TH} и α_{TV}) са определени със съотношението $\alpha_L = 10 \alpha_{TH} = 100 \alpha_{TV}$.
- Зададените в моделните пластове и зони, извън обхвата на потенциалните източници, начални стойности на относителната концентрация на SO₄ и As са нулеви. Същите стойности са приети като постоянни в реките, валежната инфилтрация и подземния поток по външните латерални граници.
- Концентрацията на SO₄ и As в постъпващия инфилтрационен поток под хвостохранилището и контактния водоем е зададена като променлива $C_{SO_4} = f(t)$ и $C_{As} = f(t)$, съобразно получените с едномерните модели решения (Табл. 14). Съгласно приетия консервативен сценарий, за всеки стрес период по цялата площ на съответния източник е приета максимална стойност на относителната концентрация на SO₄ и As в идващия поток от зоната на аерация.
- За проследяване на прогнозната концентрация на SO₄ и As в подземните води и задържаното (адсорбираното) вещество в твърдата фаза на водоносния пласт в миграционните модели са въведени 16 наблюдателни пункта с гранично условие Observation Point. Те са разположени в характерни точки по пътя на замърсителите от потенциалните източници до първия реципиент. Пет наблюдателни пункта са

ситуирани в очертанията на хвостохранилището (ОР-Н1, ОР-Н2, ОР-Н3, ОР-Н4 и ОР-Н5), един – в центъра на контактния водоем (ОР-V1), два – между източниците и първия реципиент (ОР-P1, ОР-P2 и ОР-P3) и седем – по десния бряг на дере Дълбоки дол (ОР-R1, ОР-R2, ОР-R3, ОР-R4, ОР-R5, ОР-R6 и ОР-R7). Местоположението на пунктовете е илюстрирано на фигури с номера от 27 до 42, а техните координати – в Табл. 17.

- Компютърната симулация обхваща период от 100 години.

Таблица 17. Координати на наблюдателните пунктове за проследяване на прогнозната концентрация на SO_4 и As в подземните води и задържаното (адсорбирано) вещество в твърдата фаза на водоносния пласт

Наблюдателен пункт №	Координатна система UTM-84, зона 34N		Участък
	X, m	Y, m	
ОР-V1	656044	4731175	Контактен водоем
ОР-Н1	656135	4731403	Хвостохранилище
ОР-Н2	656246	4731282	
ОР-Н3	656255	4731394	
ОР-Н4	656278	4731550	
ОР-Н5	656381	4731324	
ОР-P1	655995	4731403	Територия между източниците и първия реципиент
ОР-P2	655937	4731154	
ОР-P3	656175	4731085	
ОР-R1	655899	4731450	Дълбоки дол
ОР-R2	655875	4731354	
ОР-R3	655866	4731266	
ОР-R4	655854	4731155	
ОР-R5	655843	4731079	
ОР-R6	655836	4730997	
ОР-R7	655815	4730925	

3.3.2.3. Моделни решения за възможната миграция на SO_4 и As

Посредством миграционните 3D модели за период от 100 години е направена прогноза за размерите и степента на възможното разпространение ключовите замърсители SO_4 и As в подземните води от потенциалните източници до първия реципиент. Динамиката на този процес е илюстриран с поредица от моделни решения, представящи последователни моментни картини на засегнатите зони в края на всеки стрес период – в изчислителни времена 1, 3, 5, 7, 9, 18, 25, 50, 75 и 100 г. В характерни точки на горния водоносен пласт с графични зависимости $C_{SO_4} = f(t)$ и $C_{As} = f(t)$ са представени и промените на относителната концентрация в подземните води на SO_4 и As , както и на сорбираната (задържаната) част от тях в твърдата фаза на пласта. Тези важни и представителни като резултати от проведеното моделно изследване решения са представени по-долу в следната последователност:

- Карти на възможното разпространение на SO_4 в подземните води – Фиг. №№ 29-38;
- Карти на възможното разпространение на As в подземните води – Фиг. №№ 39-48;

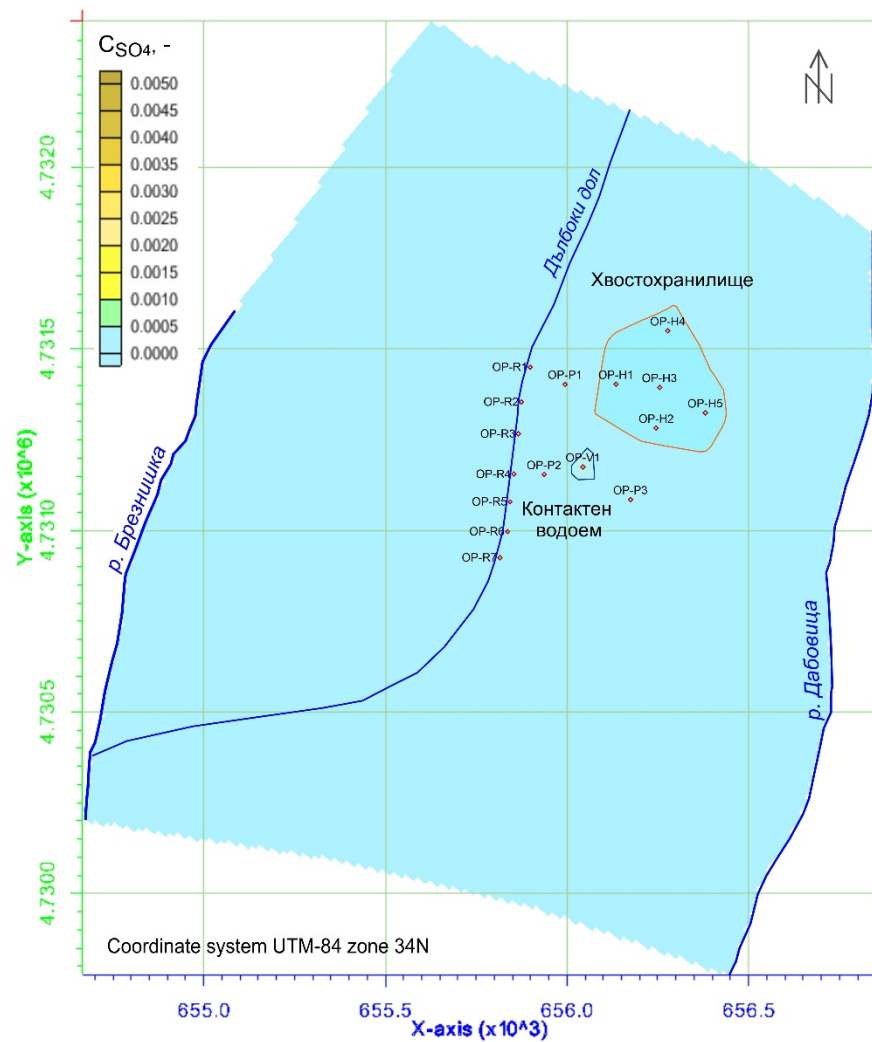
- Изменение на относителната концентрация на SO_4 в подземните води
 - ~ под контактния водоем – Фиг. 49
 - ~ под хвостохранилището – Фиг. 50
 - ~ между потенциалните източници и първия реципиент – Фиг. 51
 - ~ по десния бряг на Дълбоки дол – Фиг. 52
- Изменение на относителната концентрация на сорбираните SO_4 в твърдата фаза на водоносния пласт
 - ~ под контактния водоем – Фиг. 53
 - ~ под хвостохранилището – Фиг. 54
 - ~ между потенциалните източници и първия реципиент – Фиг. 55
 - ~ по десния бряг на Дълбоки дол – Фиг. 56
- Изменение на относителната концентрация на As в подземните води
 - ~ под контактния водоем – Фиг. 57
 - ~ под хвостохранилището – Фиг. 58
 - ~ между потенциалните източници и първия реципиент – Фиг. 59
 - ~ по десния бряг на Дълбоки дол – Фиг. 60
- Изменение на относителната концентрация на сорбираните As в твърдата фаза на водоносния пласт
 - ~ под контактния водоем – Фиг. 61
 - ~ под хвостохранилището – Фиг. 62
 - ~ между потенциалните източници и първия реципиент – Фиг. 63
 - ~ по десния бряг на Дълбоки дол – Фиг. 64

3.3.3. Анализ на резултатите от тримерните прогнозни модели

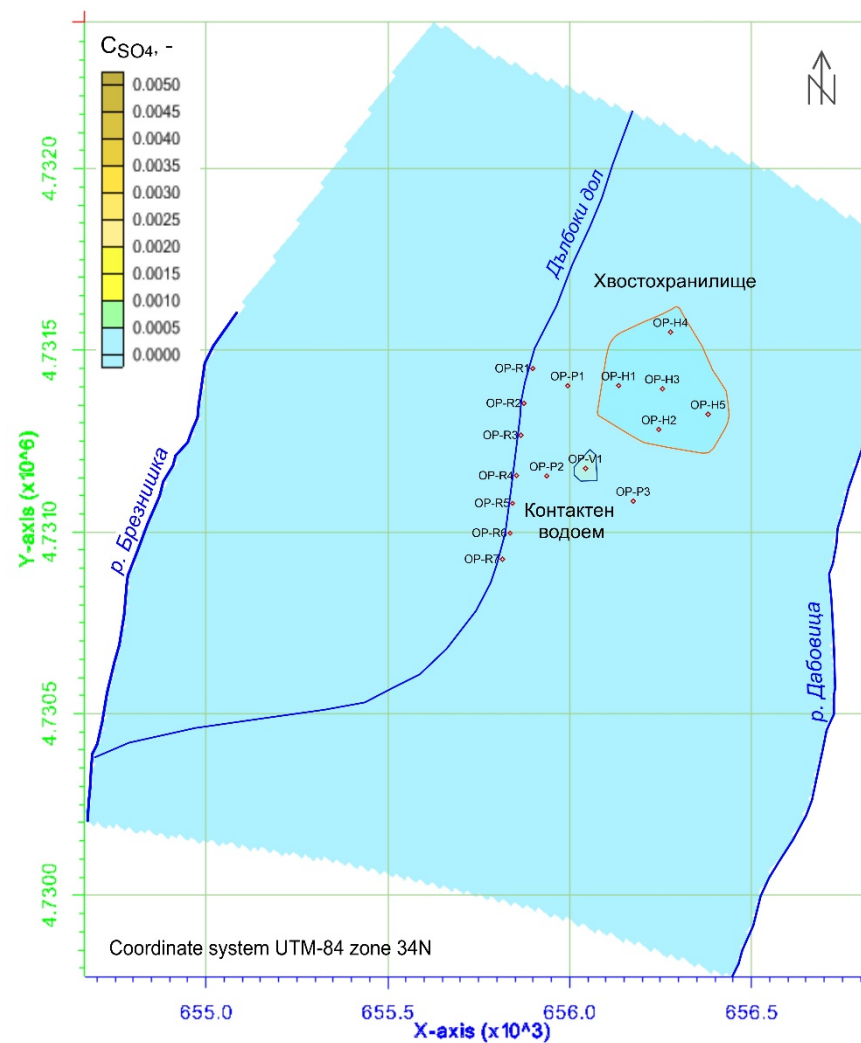
Сравнителният анализ на резултатите от направените с тримерните модели компютърни симулации, илюстрирани с поредицата от карти и графики – Фиг. №№ 29-64, дава основание да се направи следния коментар относно развитието, обхвата и степента на възможното замърсяване на подземните води от хвостохранилището и контактния водоем:

- Основен механизъм за движение на замърсителите във водонаситената зона е конвективният пренос. Посоката на хоризонталните компоненти на векторите на концентрационното поле, се контролира напълно от структурата на подземния поток в горния водопрпусклив пласт. Това предполага, фронтът на замърсяване да се движи на ЮЗ-З, следвайки естествената посока на подземните води.
- Постъпилите във водонаситената зона замърсители се очаква да мигрират не само латерално, но и в дълбочина. Вертикалният пренос се детерминира от плътностните разлики между замърсените подземни води и лежащите под тях незамърсени води, респ. от концентрационните градиенти. Достигайки в дълбочина до слабопроницаеми части на скалния масив, замърсителите ще мигрират отново по посока на филтрационното течение, като формират характерен „шлейф”.
- При своето движение във водонаситената зона изследваните замърсители (SO_4 и As) съвсем логично демонстрират съществени различия в своето поведение.

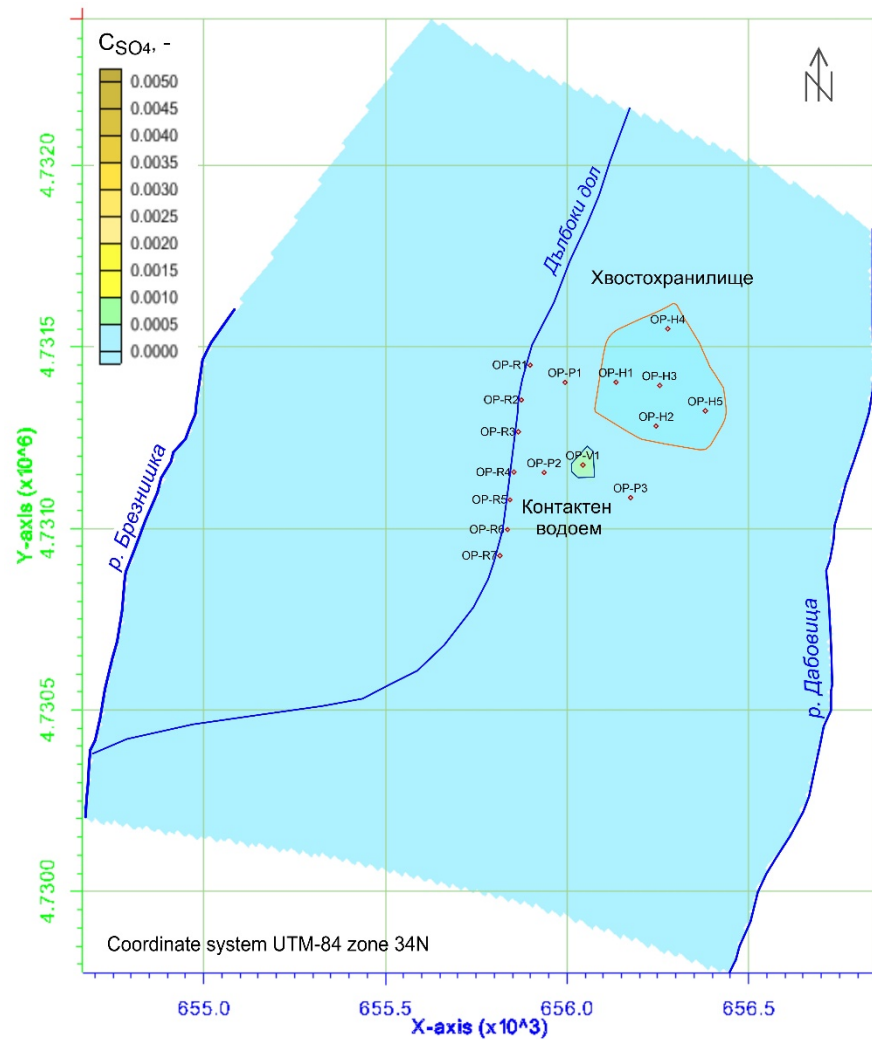
- ~ Практически несорбируемите SO_4 са консервативни, трудно взаимодействат с твърдата фаза и се движат със скоростта на подземния поток. Затова с пълно основание приемаме, че очертанията на зоната с повишено съдържание на SO_4 маркират максималните граници на възможно въздействие върху подземните води от потенциалните източници, респ. максималния обхват на евентуалното замърсяване на подземните води.
- ~ Силно сорбируемият As активно взаимодейства с филтрационната среда, което предопределя и много слабата му подвижност. Неговото присъствие в подземните води очертава най-силно засегнатата зона около потенциалните източници, т.е. зоната с най-висока степен на въздействие или замърсяване.
- Зоната с повишено съдържание на SO_4 за период от 100 г. ще обхване съвсем малка част от горния водопронируем пласт, включваща в границите си площадките на потенциалните източници и прилежащите им територии до дере Дълбоки дол – Фиг. №№ 29-38. Това всъщност, са и границите на **зоната на възможно въздействие върху състава и качествата на подземните и повърхностните води от хвостохранилището и контактния водоем за целия период на тяхната експлоатация (активна и пасивна)**. Максималната площ на засегнатата част от водоносната структура няма да надхвърли $0,30 \text{ km}^2$, а в дълбочина ще достига най-много до 15-20 m. Същевременно, в тази част на подповърхностното пространство относителната концентрация на SO_4 в подземните води ще е много ниска, най-често в диапазона от $2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$. Тези стойности постепенно ще намаляват в резултат на процесите на хидродисперсия и смесване, особено след прекратяване на добива и рекултивацията на съоръженията.
- До първия реципиент (Дълбоки дол) първите „порции“ SO_4 , постъпващи под дъното на потенциалните източници, ще достигнат след около 25 г. от началото на компютърната симулация, като в количествен аспект те ще достигнат своя максимум в следващите 70-100 години – Фиг. 52. Подземният поток с повишено съдържание на SO_4 ще се дренира на фронт с дължина около 200-250 m, като очакваните относителни концентрации ще са много ниски – от $1,0 \cdot 10^{-4}$ до $1,2 \cdot 10^{-3}$, средно около $5 \cdot 10^{-4}$. Като добавим факта, че сумарното количество на дрениращите в този интервал води е също незначително (не повече от 0,35 L/s), може да се направи заключението, че и възможното въздействие върху повърхностните води ще е нищожно.
- Зоната със следи за наличие на As в горния водопронируем пласт обхваща площта в очертанията на потенциалните източници, която в края на компютърната симулация е много слабо изтеглена на около 30-40 m по посока на подземния поток към Дълбоки дол – Фиг. №№ 39-48. Статичната картина се допълва от съвсем символичните стойности на относителната концентрация на As – най-често между $1 \cdot 10^{-19}$ и $2 \cdot 10^{-15}$ (Фиг. №№ 59-60). Тези стойности нямат практическо значение, дори са трудно измерими, но по ирония маркират зоната с възможно най-висока степен на въздействие от потенциалните източници. От казаното следва, че няма реална опасност подземните води да бъдат замърсени с As или други тежки метали.
- Немаловажен факт е, че в детерминирани зони на въздействие прогнозните стойностите на относителните концентрации на задържаните SO_4 и As от филтрационната среда (в твърдата фаза) са съвсем незначителни – около 10^{-7} - 10^{-6} за SO_4 и приблизително 10^{-21} - 10^{-17} за As. Това е напълно обяснимо, предвид голямата инертност на SO_4 и изключително ниското, съвсем символично присъствие на As в подземните води.



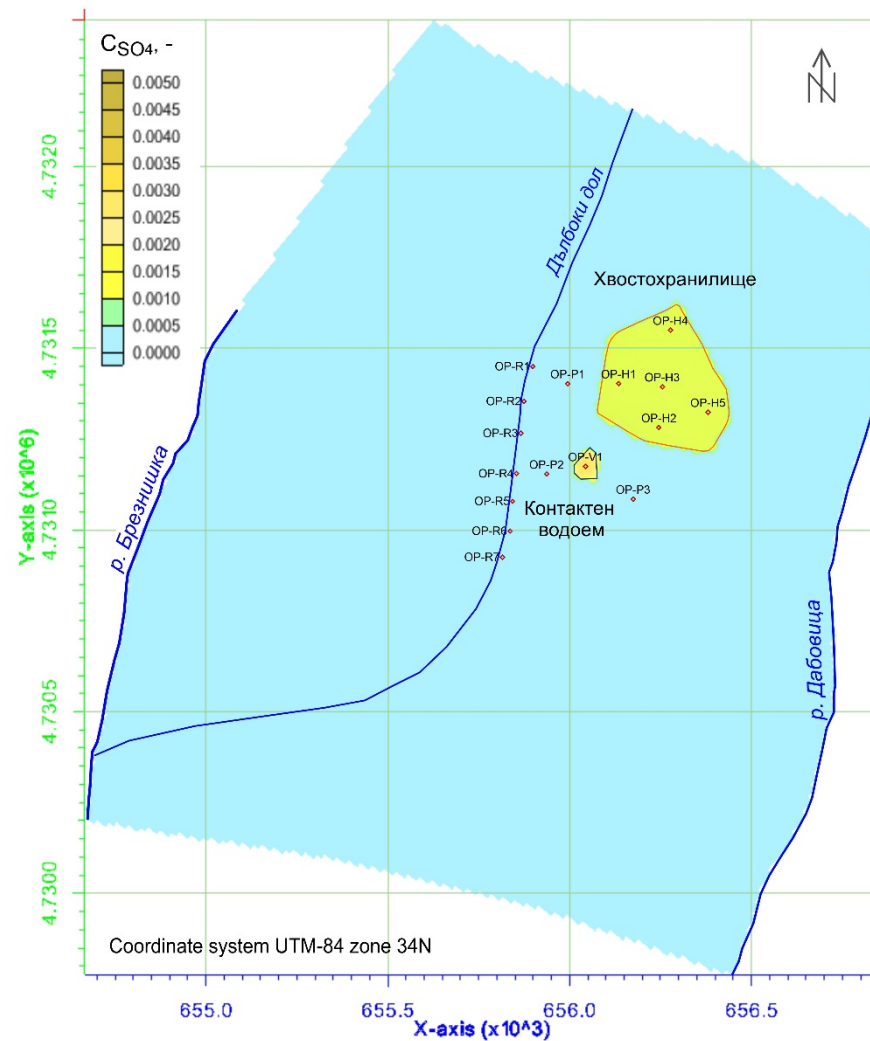
Фиг. 29. Модел MTM- SO_4 . Карта на възможното разпространение на SO_4 в подземните води. Изчислително време 1 година.



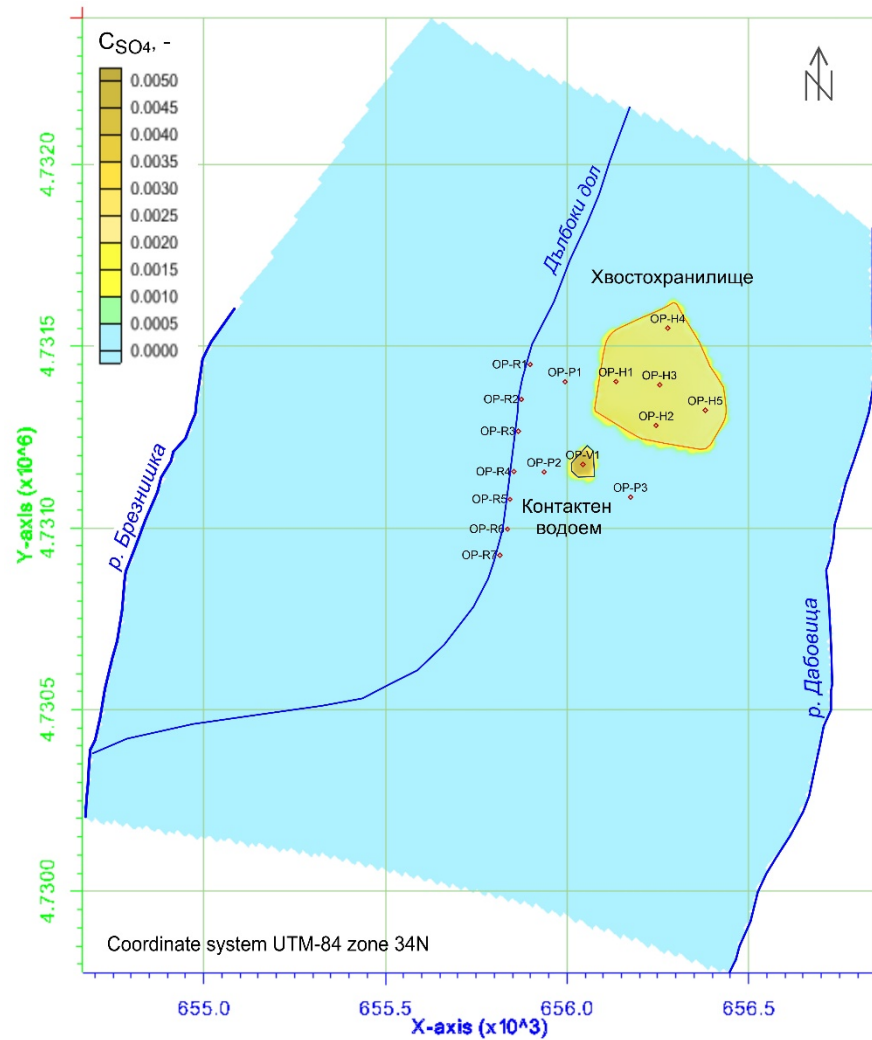
Фиг. 30. Модел MTM- SO_4 . Карта на възможното разпространение на SO_4 в подземните води. Изчислително време 3 години.



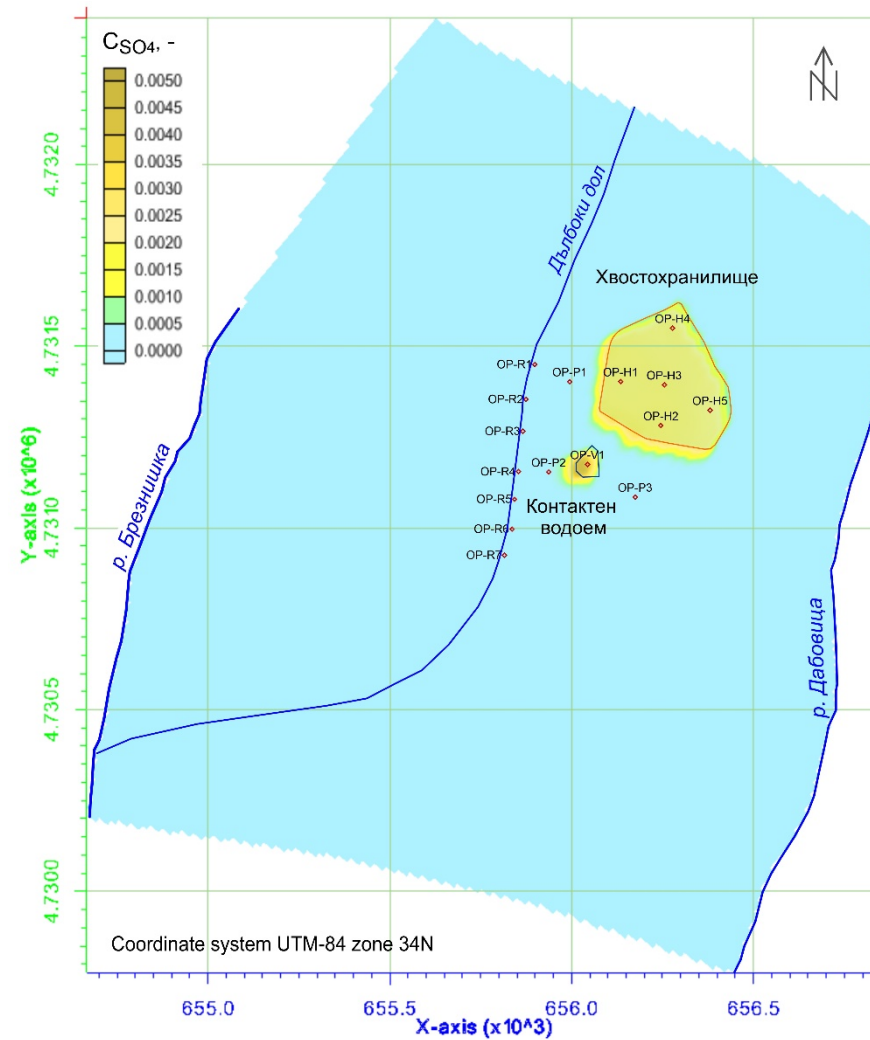
Фиг. 31. Модел MTM- SO_4 . Карта на възможното разпространение на SO_4 в подземните води. Изчислително време 5 година.



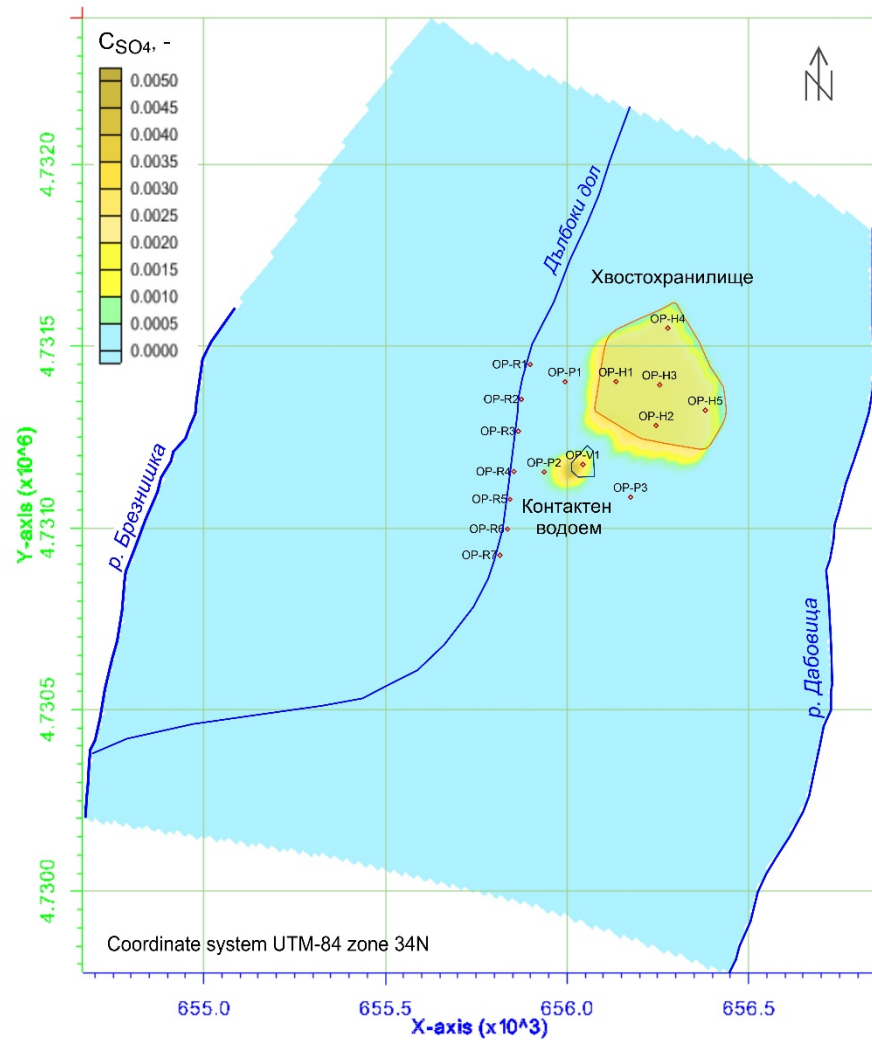
Фиг. 32. Модел MTM- SO_4 . Карта на възможното разпространение на SO_4 в подземните води. Изчислително време 7 години.



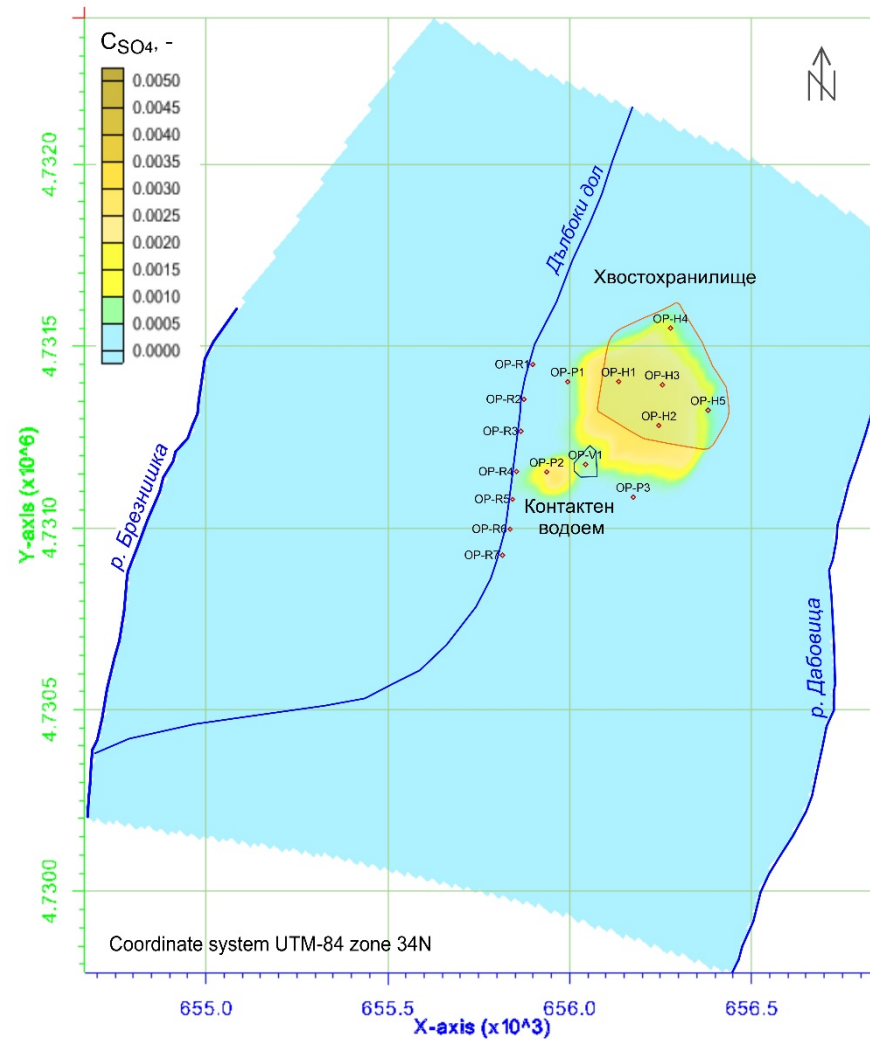
Фиг. 33. Модел MTM- SO_4 . Карта на възможното разпространение на SO_4 в подземните води. Изчислително време 9 години.



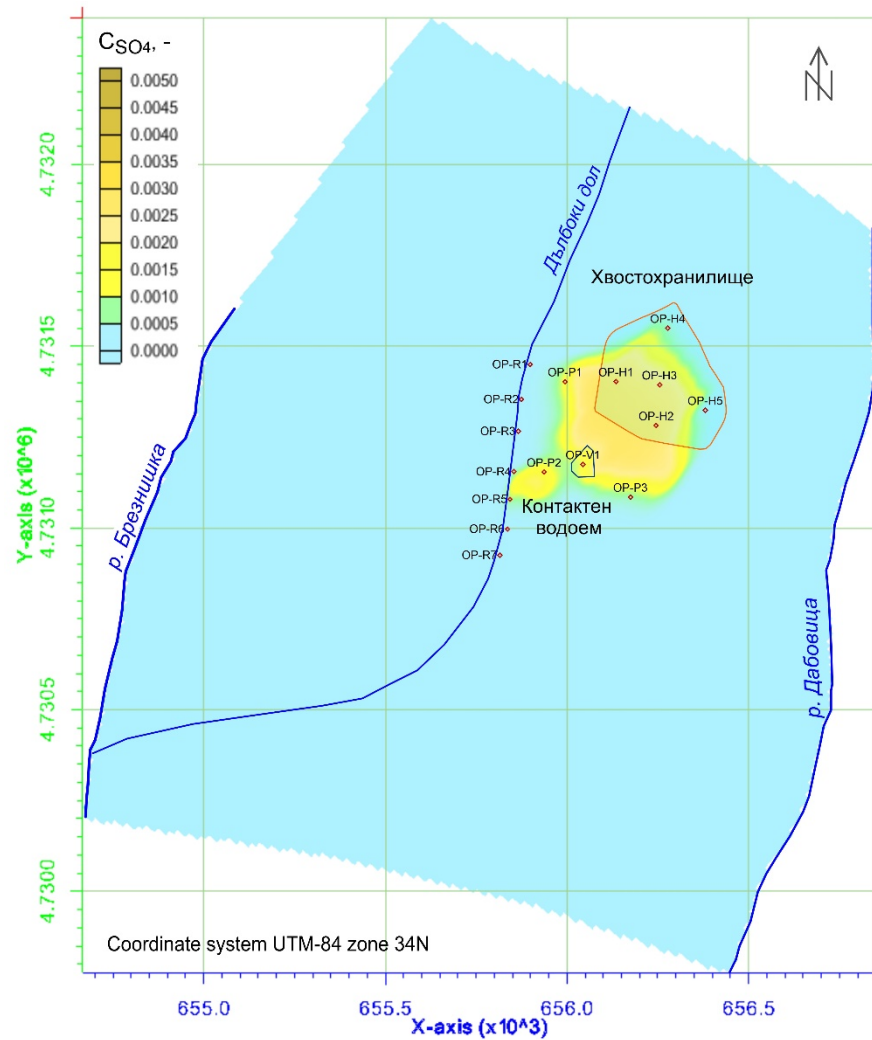
Фиг. 34. Модел MTM- SO_4 . Карта на възможното разпространение на SO_4 в подземните води. Изчислително време 18 години.



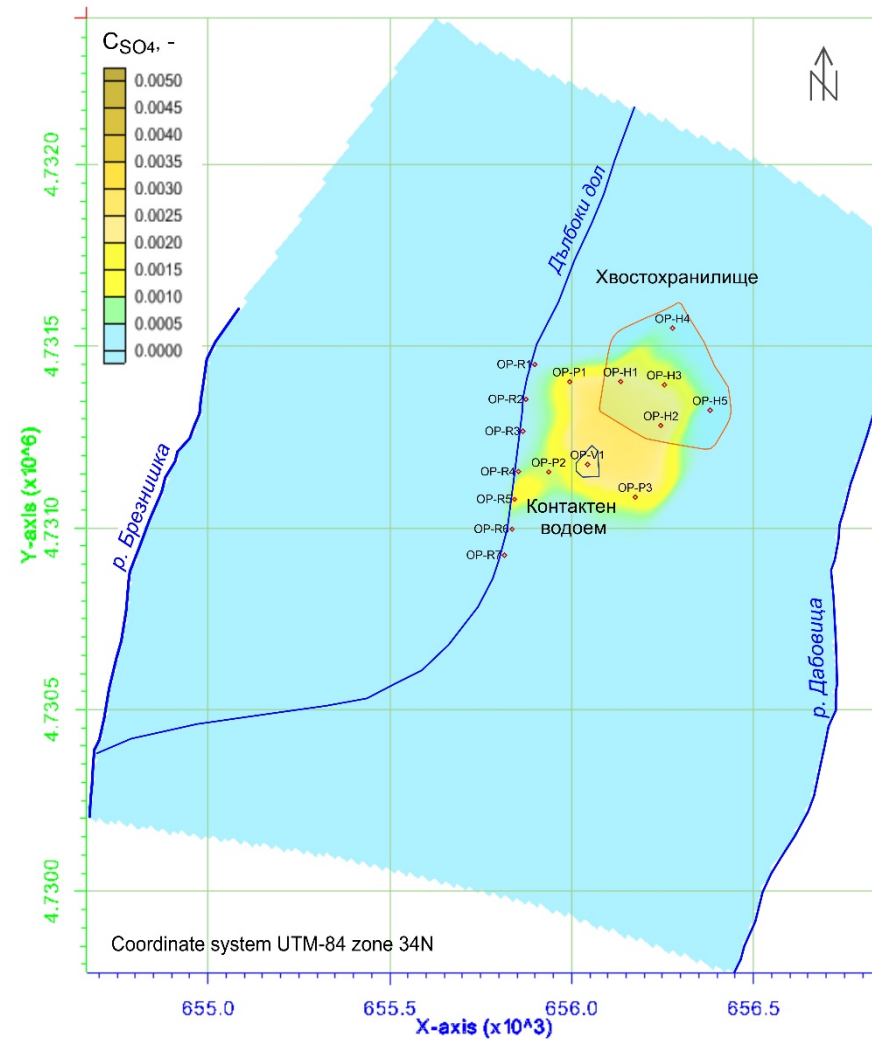
Фиг. 35. Модел MTM-SO₄. Карта на възможното разпространение на SO₄ в подземните води. Изчислително време 25 години.



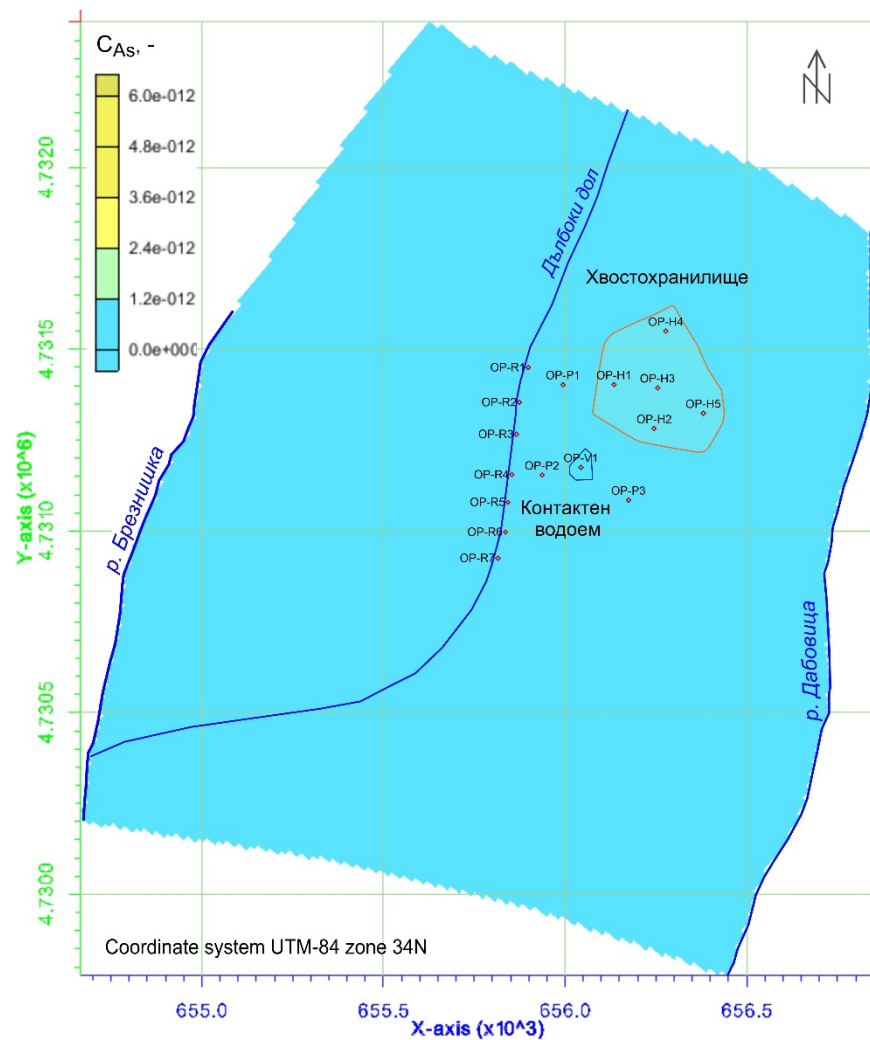
Фиг. 36. Модел MTM-SO₄. Карта на възможното разпространение на SO₄ в подземните води. Изчислително време 50 години.



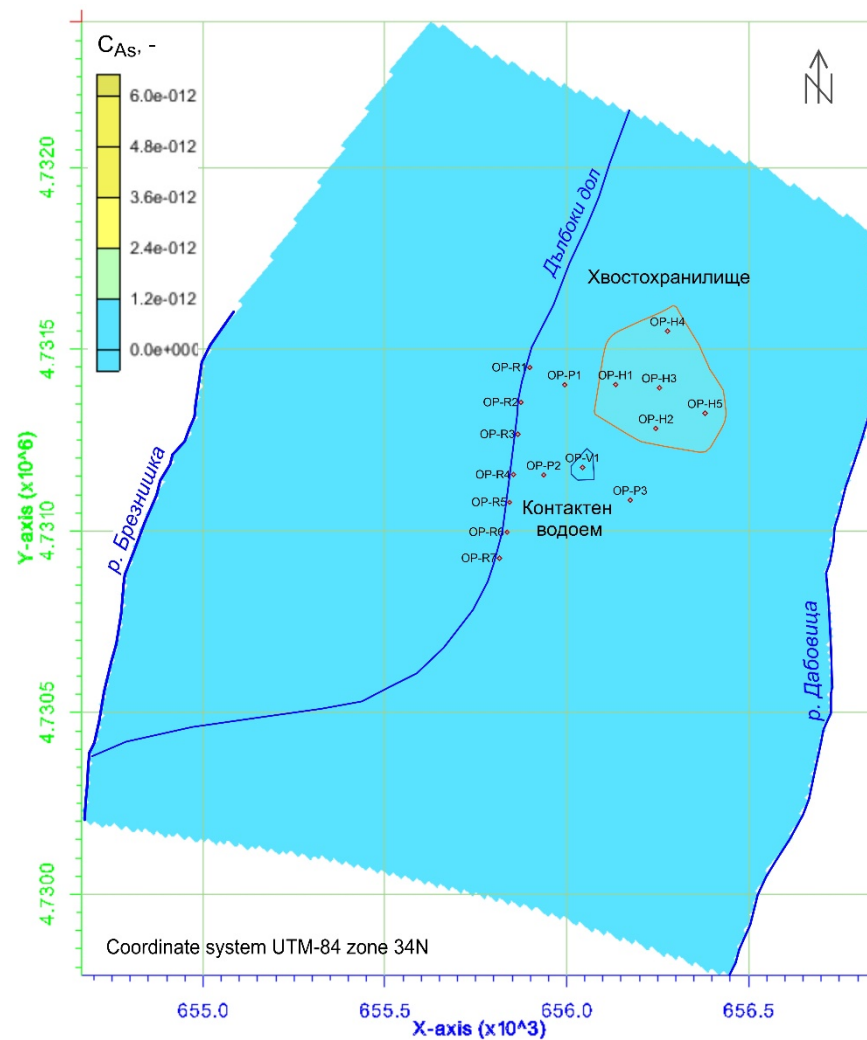
Фиг. 37. Модел MTM- SO_4 . Карта на възможното разпространение на SO_4 в подземните води. Изчислително време 75 години.



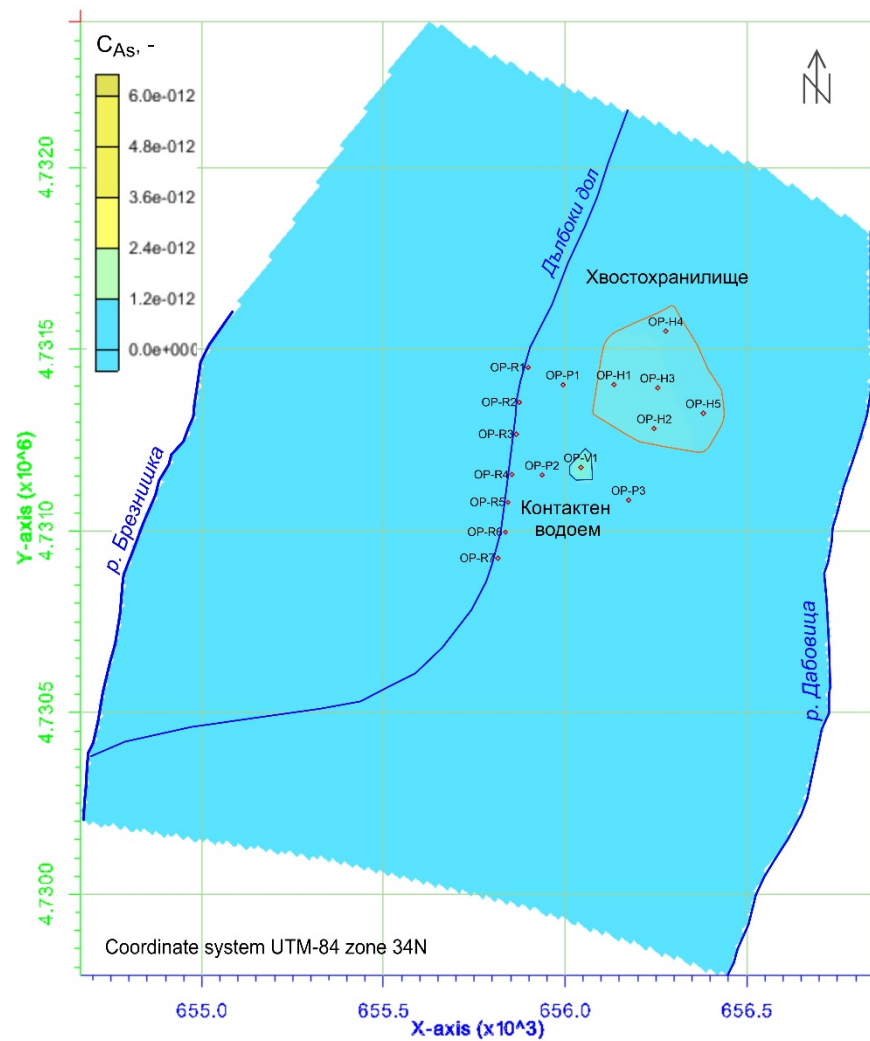
Фиг. 38. Модел MTM- SO_4 . Карта на възможното разпространение на SO_4 в подземните води. Изчислително време 100 години.



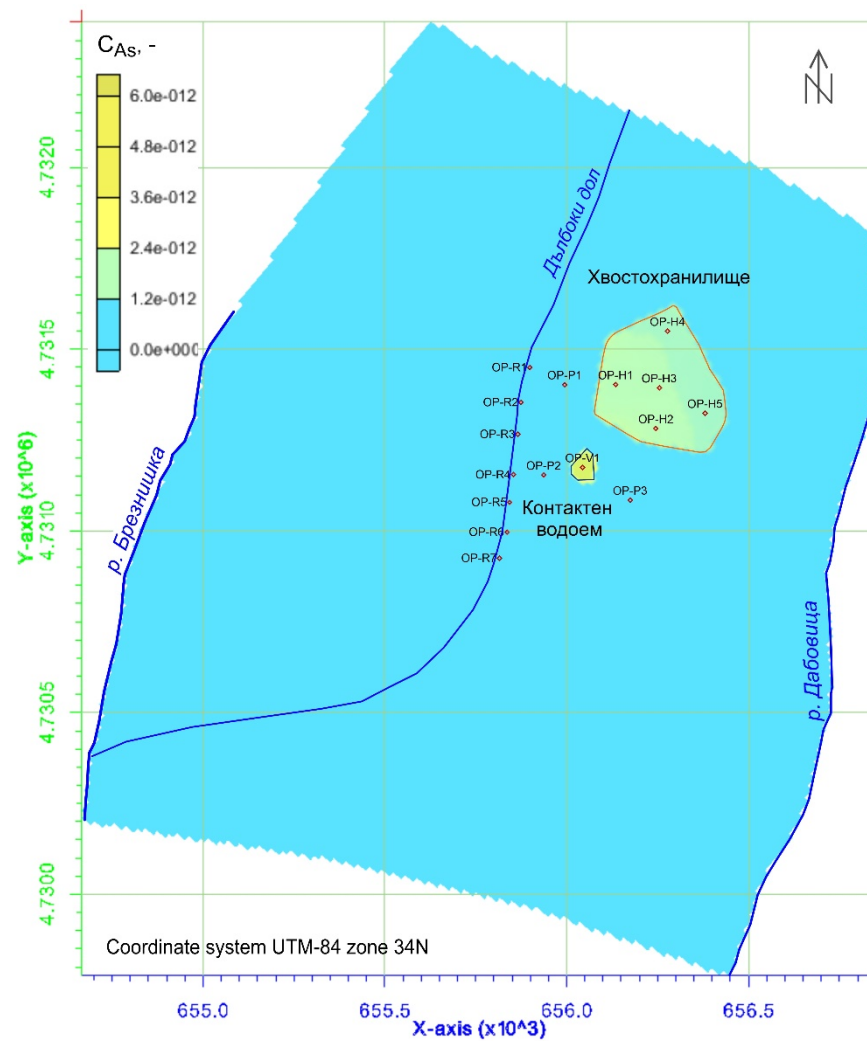
Фиг. 39. Модел МТМ-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 1 година.



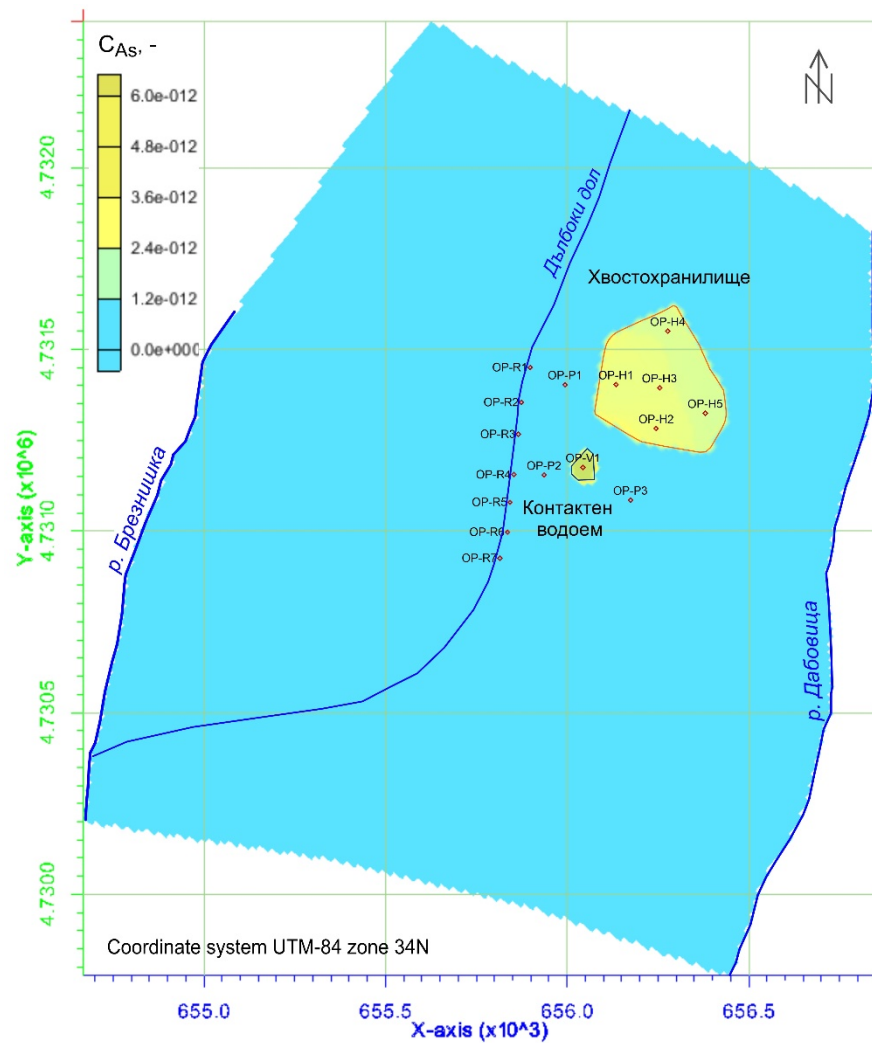
Фиг. 40. Модел МТМ-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 3 години.



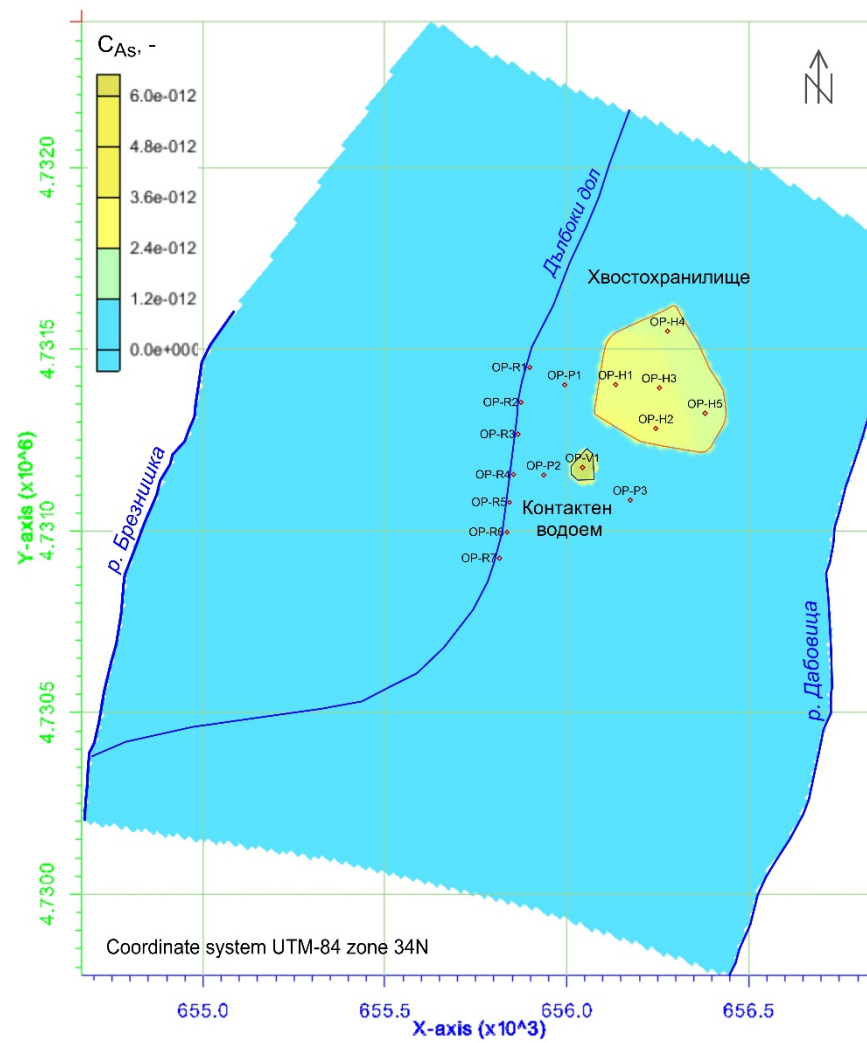
Фиг. 41. Модел МТМ-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 5 години.



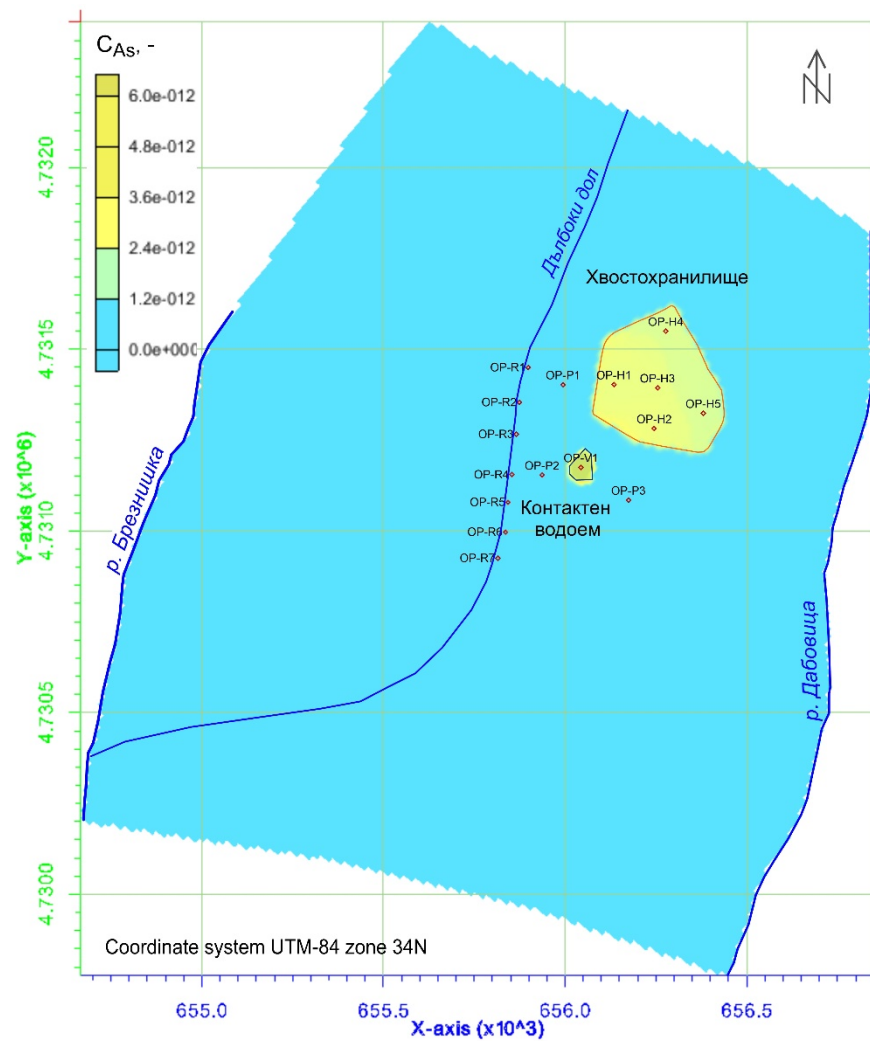
Фиг. 42. Модел МТМ-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 7 години.



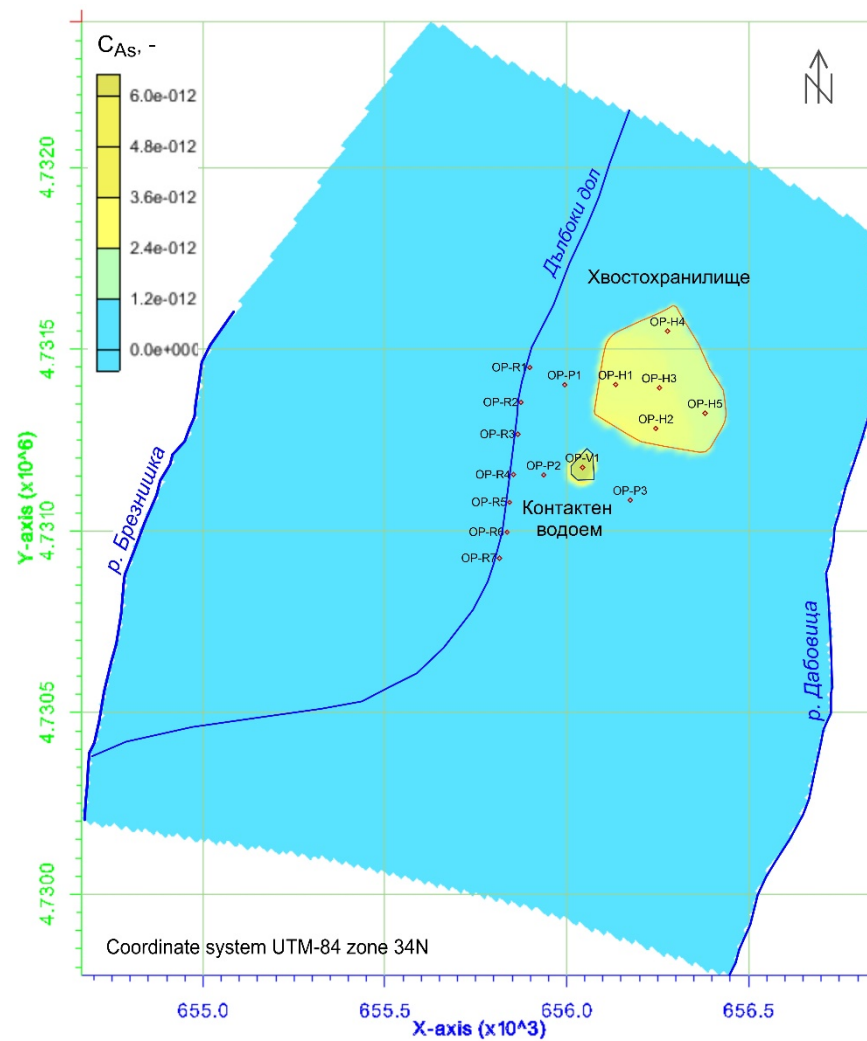
Фиг. 43. Модел МТМ-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 9 години.



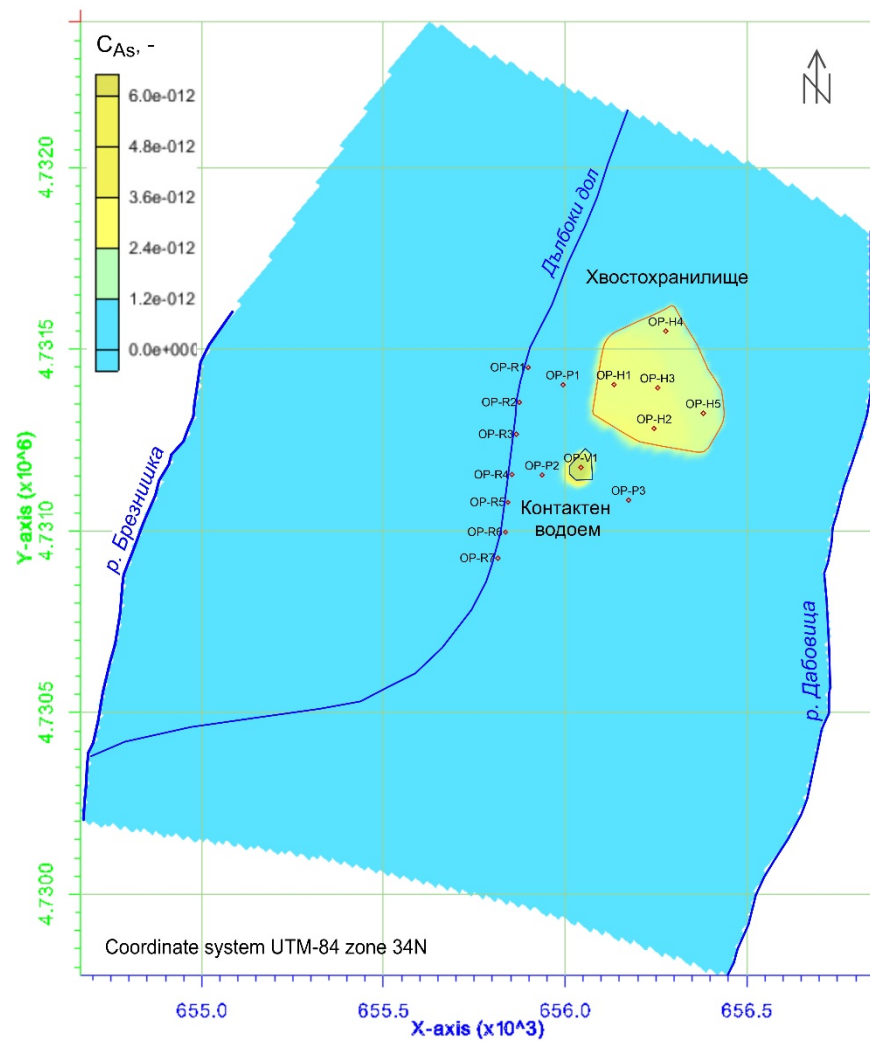
Фиг. 44. Модел МТМ-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 18 години.



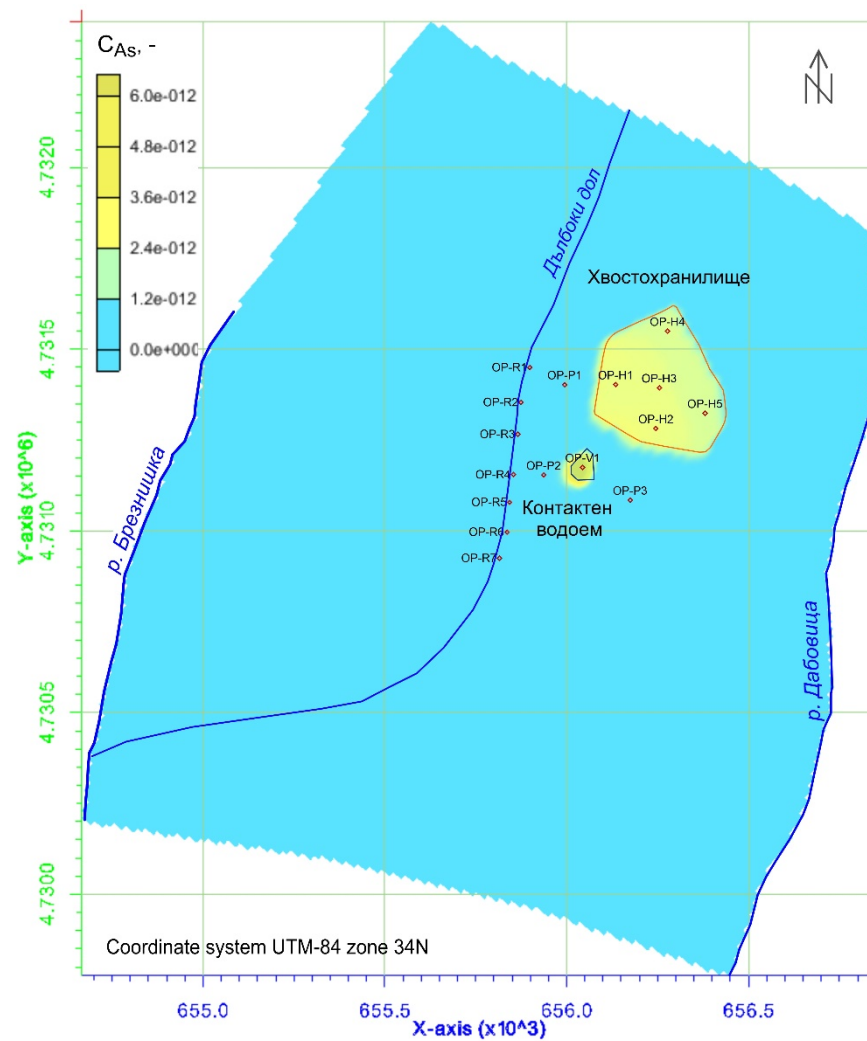
Фиг. 45. Модел МТМ-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 25 години.



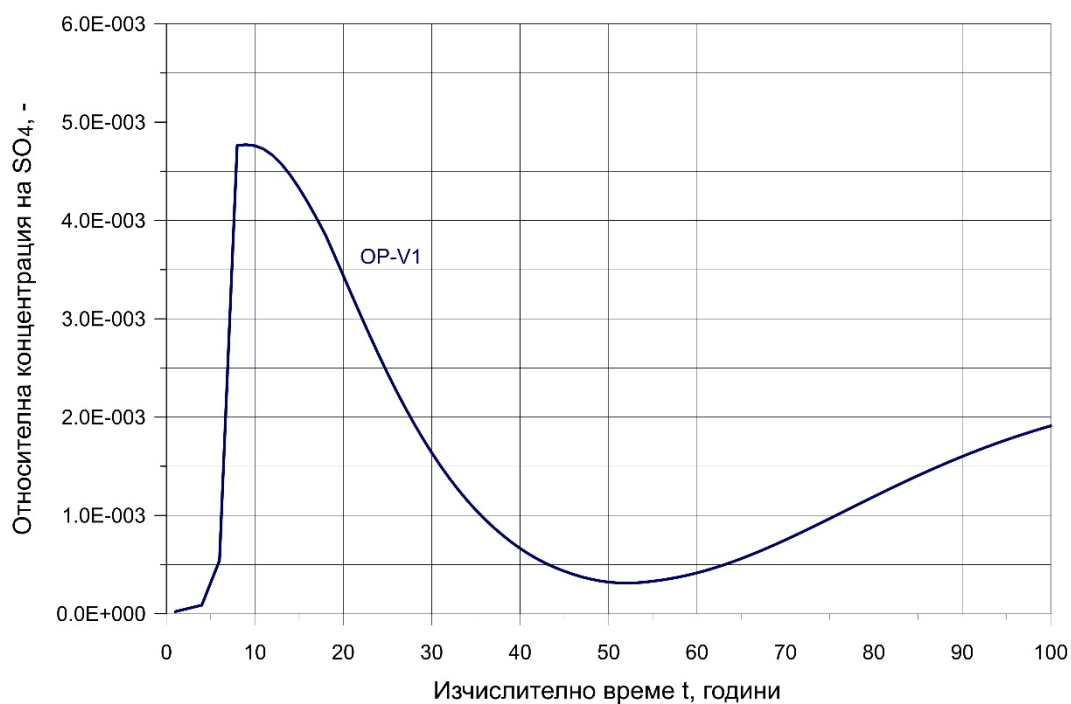
Фиг. 46. Модел МТМ-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 50 години.



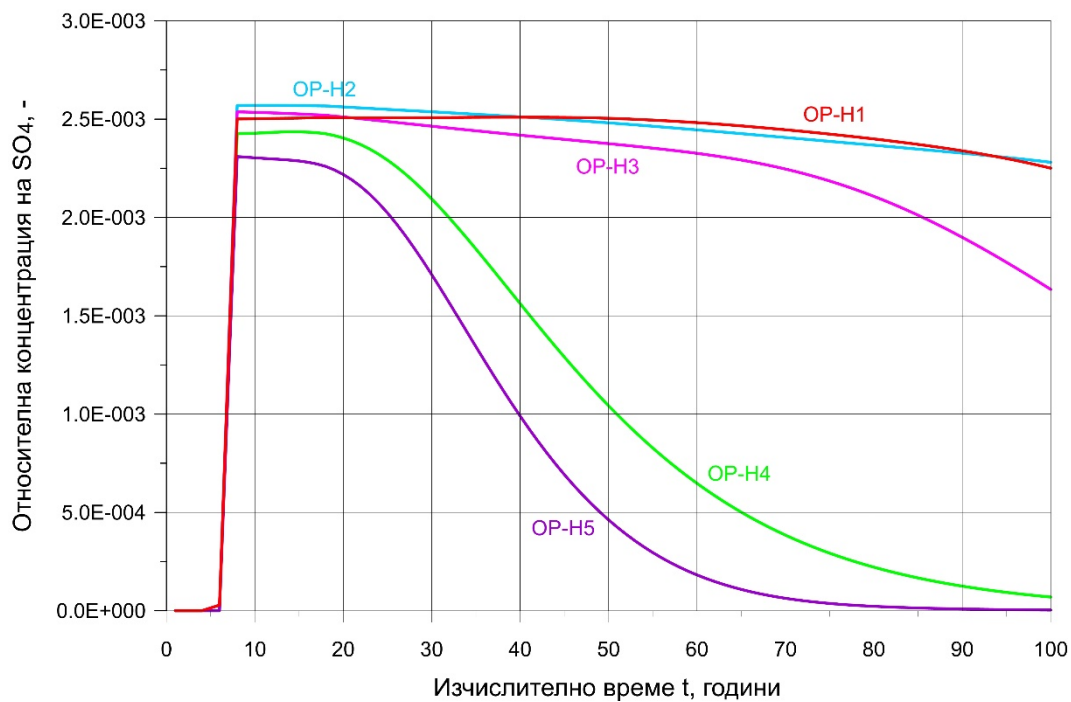
Фиг. 47. Модел MTM-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 75 години.



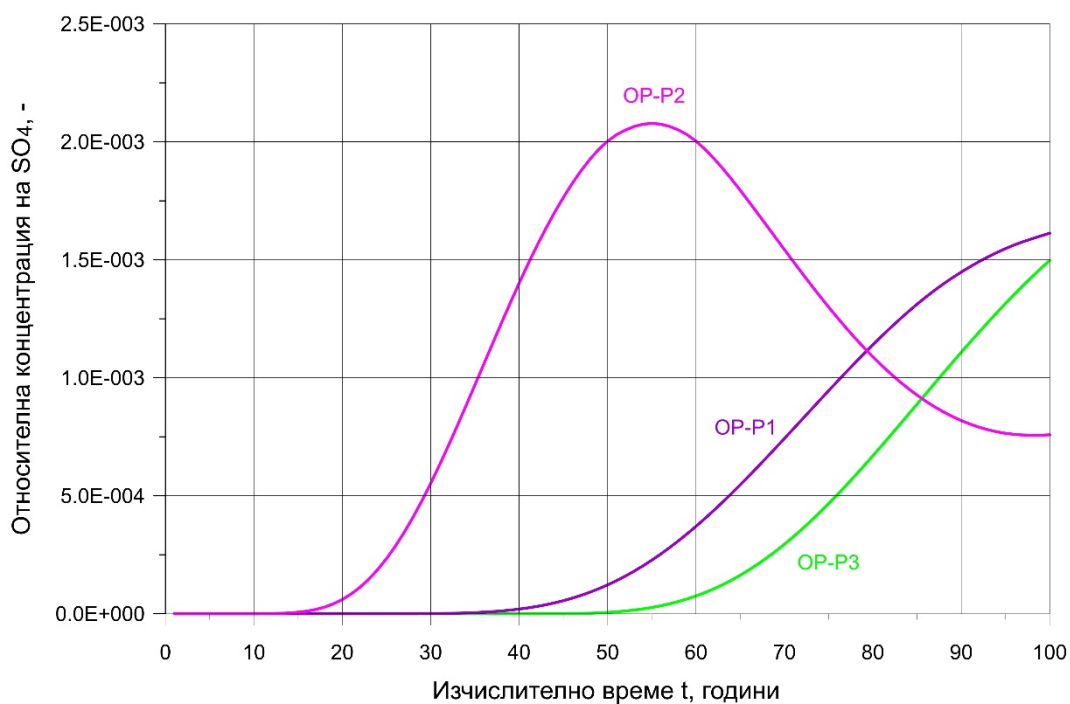
Фиг. 48. Модел MTM-As. Карта на възможното разпространение на As в подземните води. Изчислително време 100 години.



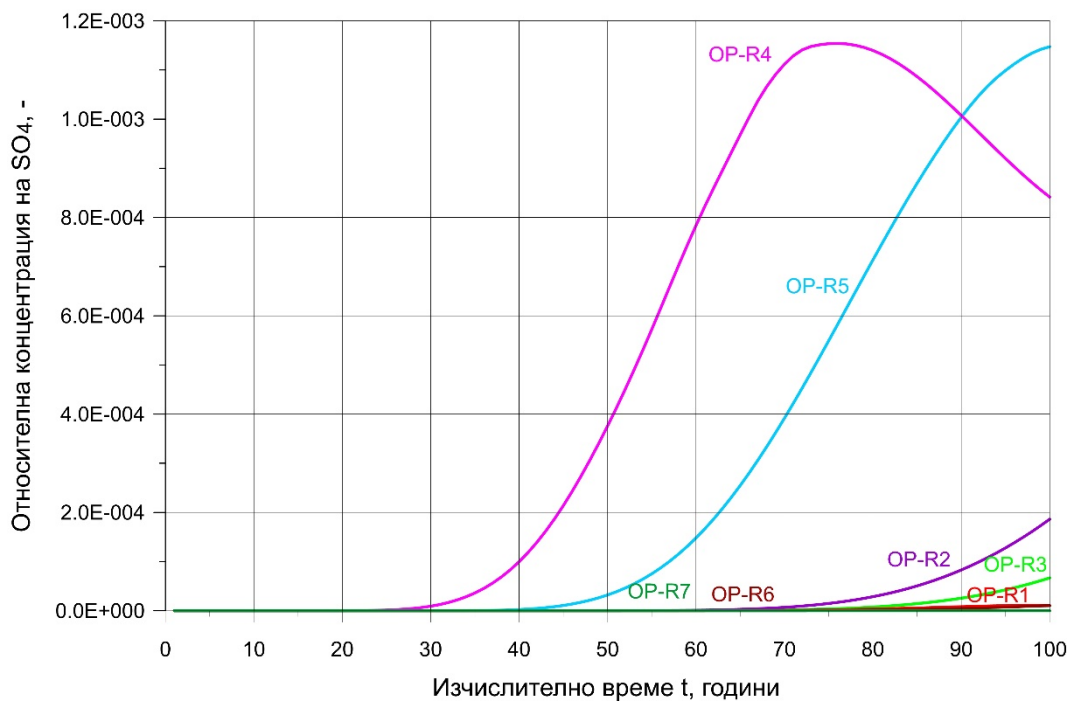
Фиг. 49. Модел MTM- SO_4 . Изменение на относителната концентрация на SO_4 в подземните води под контактния водоем – пункт OP-V1.



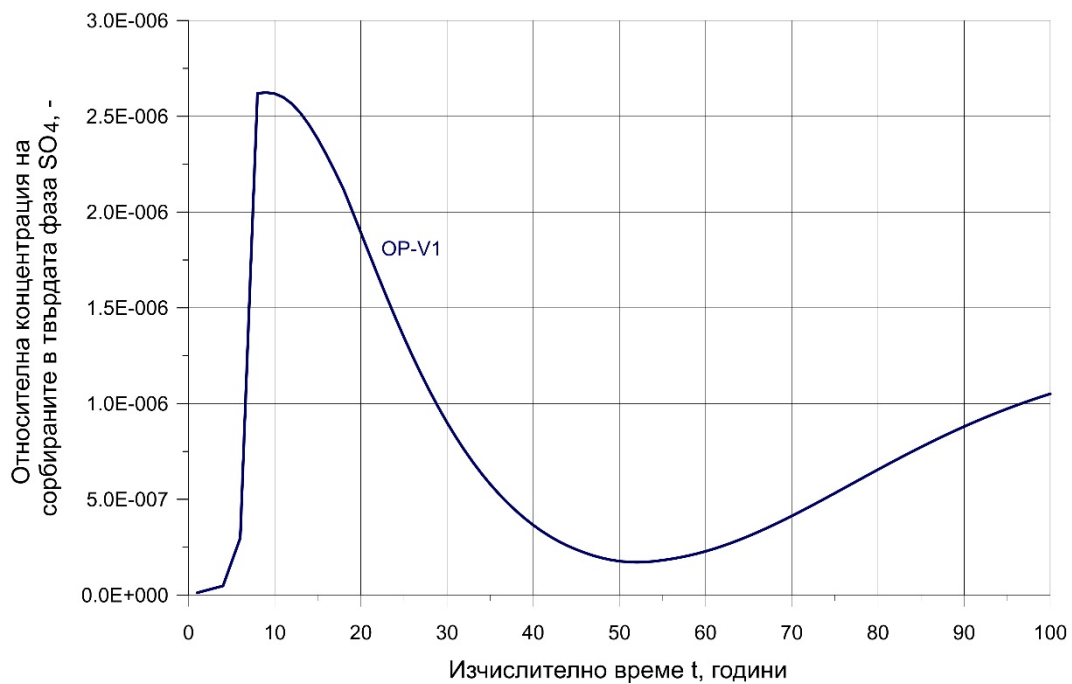
Фиг. 50. Модел MTM- SO_4 . Изменение на относителната концентрация на SO_4 в подземните води под дъното на хвостохранилището – пунктове OP-H1, OP-H2, OP-H3, OP-H4 и OP-H5.



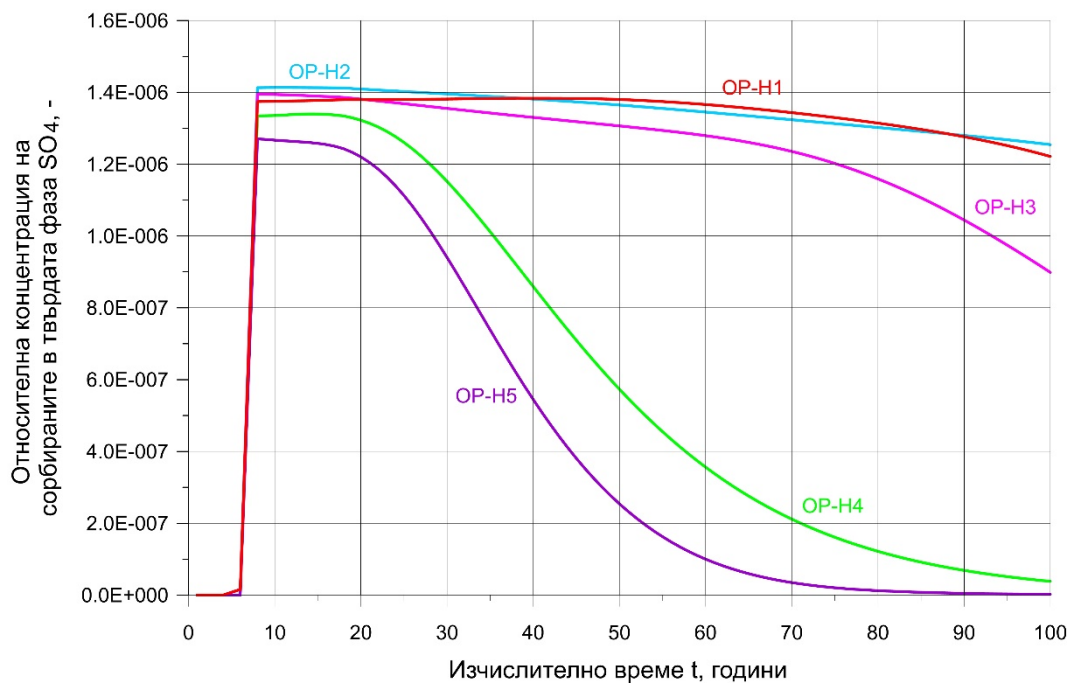
Фиг. 51. Модел MTM-SO₄. Изменение на относителната концентрация на SO₄ в подземните води между потенциалните източници и първия реципиент Дълбоки дол – пунктове OP-P1, OP-P2 и OP-P3.



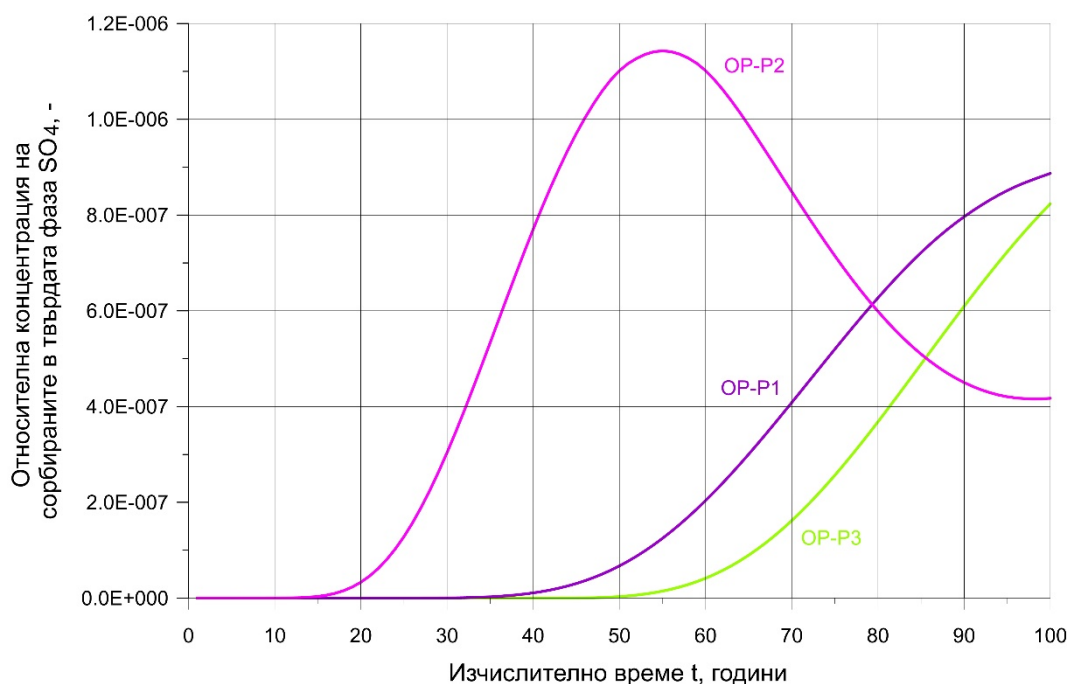
Фиг. 52. Модел MTM-SO₄. Изменение на относителната концентрация на SO₄ в подземните води, които се дренират в Дълбоки дол – пунктове OP-R1, OP-R2, OP-R3, OP-R4, OP-R5, OP-R6 и OP-R7.



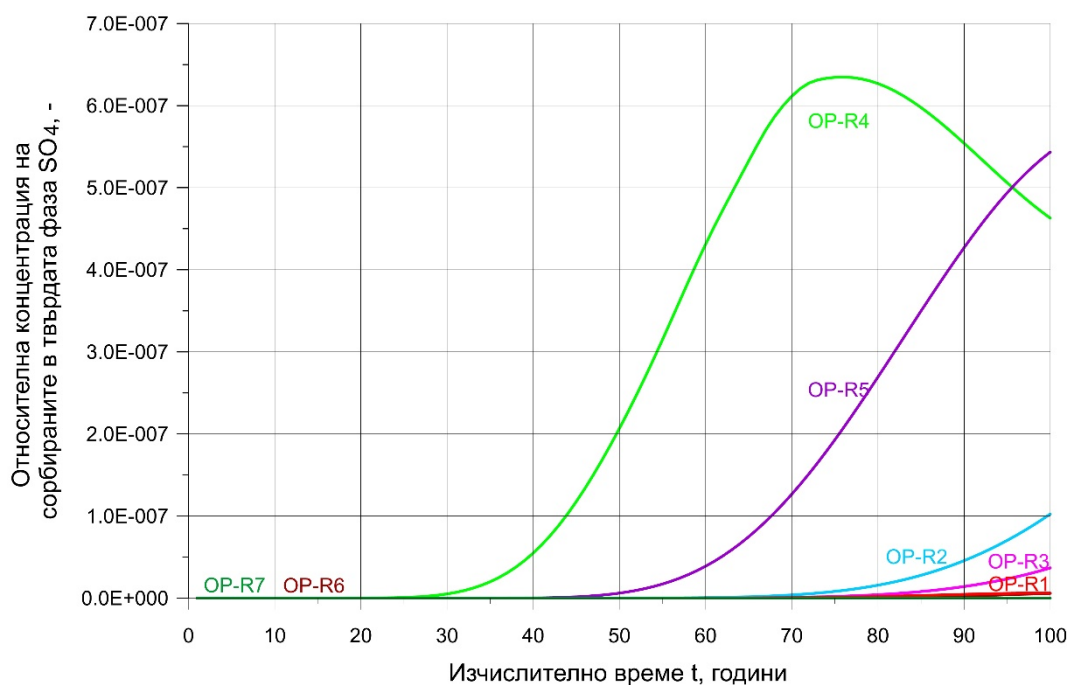
Фиг. 53. Модел MTM- SO_4 . Изменение на относителната концентрация на сорбираните SO_4 в твърдата фаза на водоносния пласт под контактния водоем – пункт OP-V1.



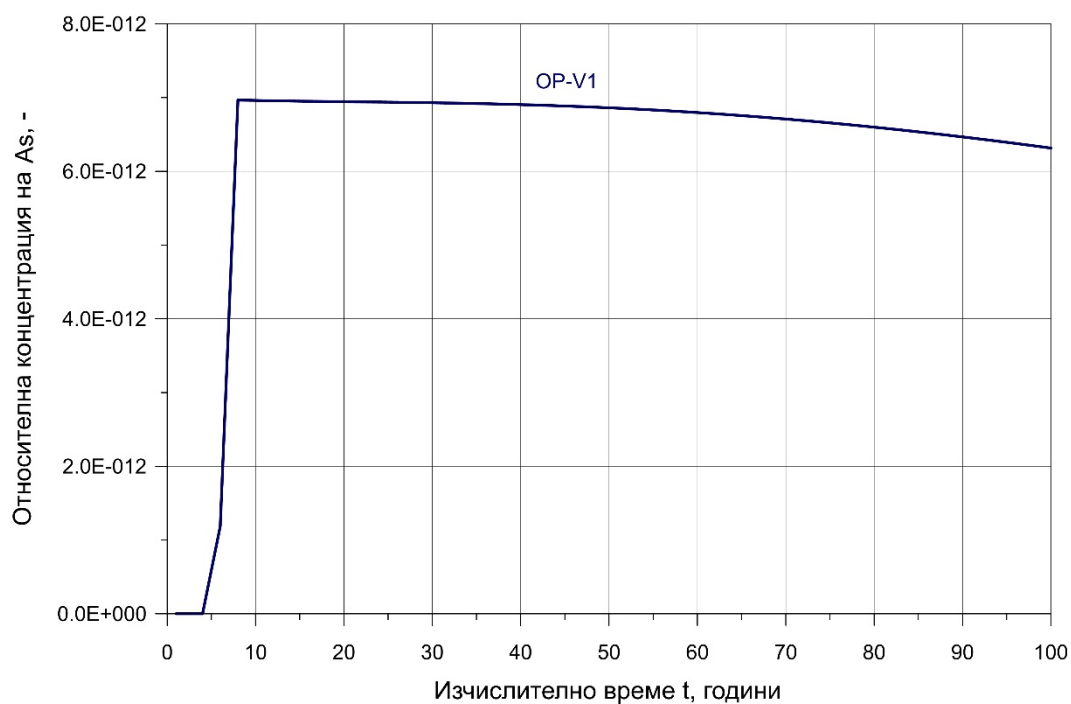
Фиг. 54. Модел MTM- SO_4 . Изменение на относителната концентрация на сорбираните SO_4 в твърдата фаза на водоносния пласт под дъното на хвостохранилището – пунктове OP-H1, OP-H2, OP-H3, OP-H4 и OP-H5.



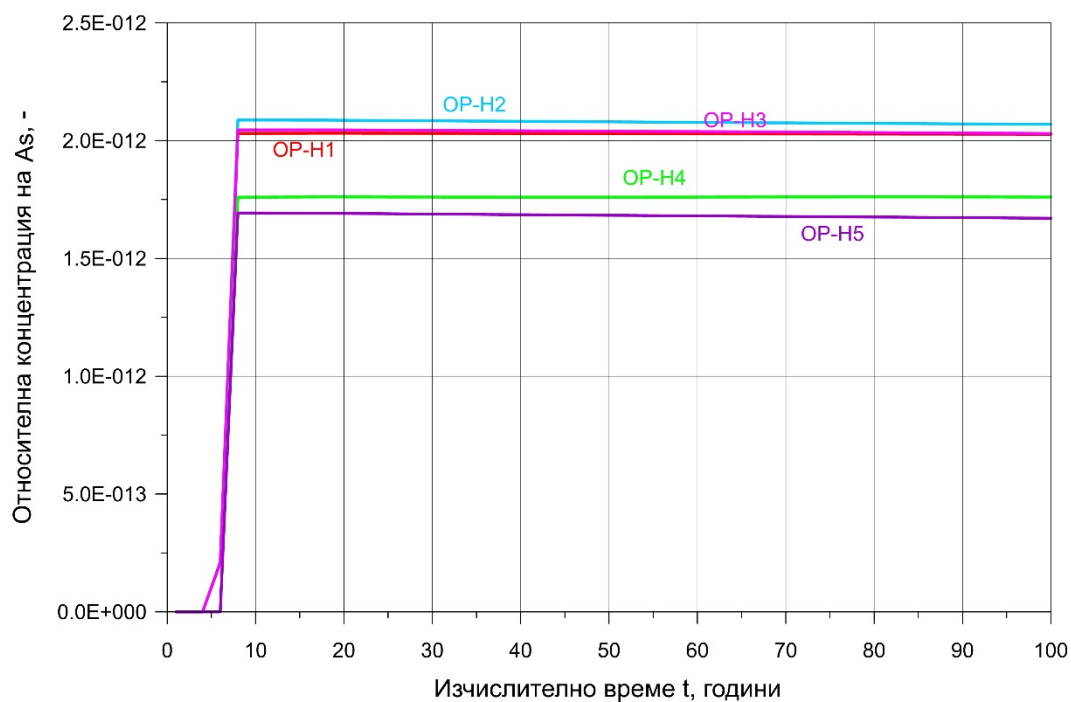
Фиг. 55. Модел MTM-SO₄. Изменение на относителната концентрация на сорбираните SO₄ в твърдата фаза на водоносния пласт между потенциалните източници и първия реципиент Дълбоки дол – пунктове OP-P1, OP-P2 и OP-P3.



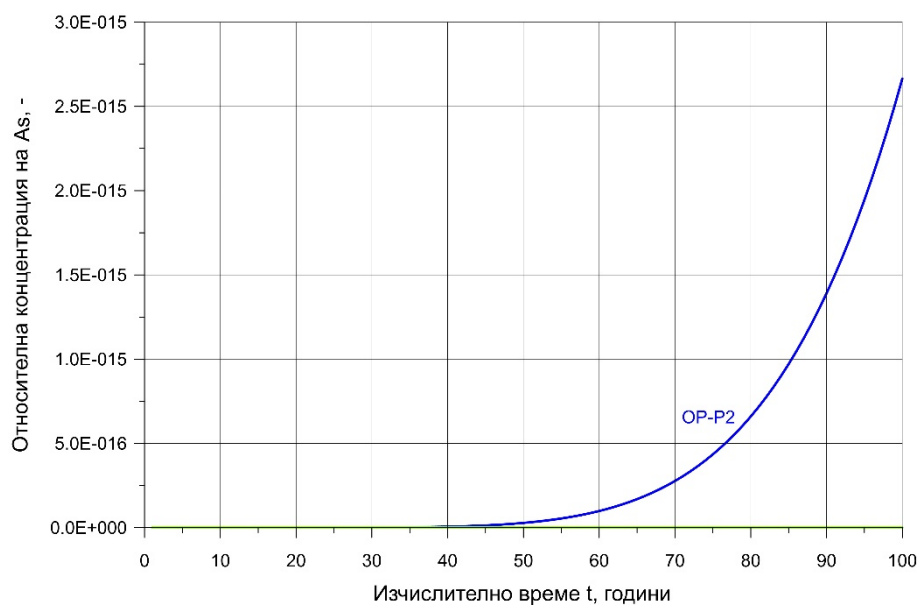
Фиг. 56. Модел MTM-SO₄. Изменение на относителната концентрация на сорбираните SO₄ в твърдата фаза на водоносния пласт по десния бряг на Дълбоки дол – пунктове OP-R1, OP-R2, OP-R3, OP-R4, OP-R5, OP-R6 и OP-R7.



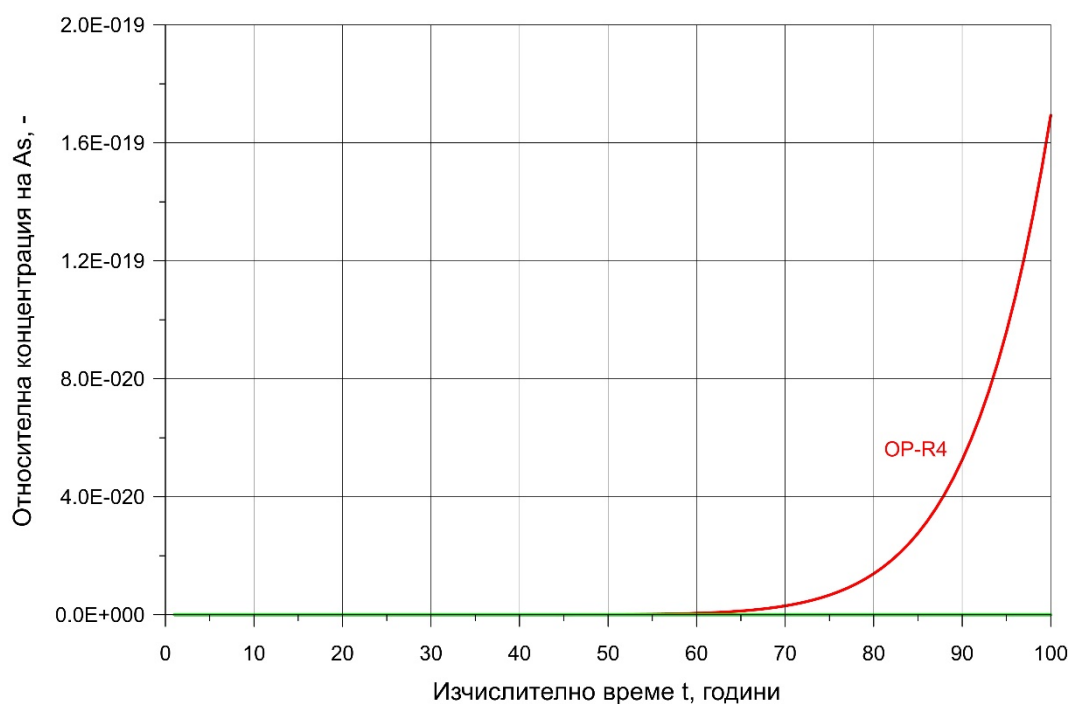
Фиг. 57. Модел MTM-As. Изменение на относителната концентрация на As в подземните води под контактния водоем – пункт OP-V1.



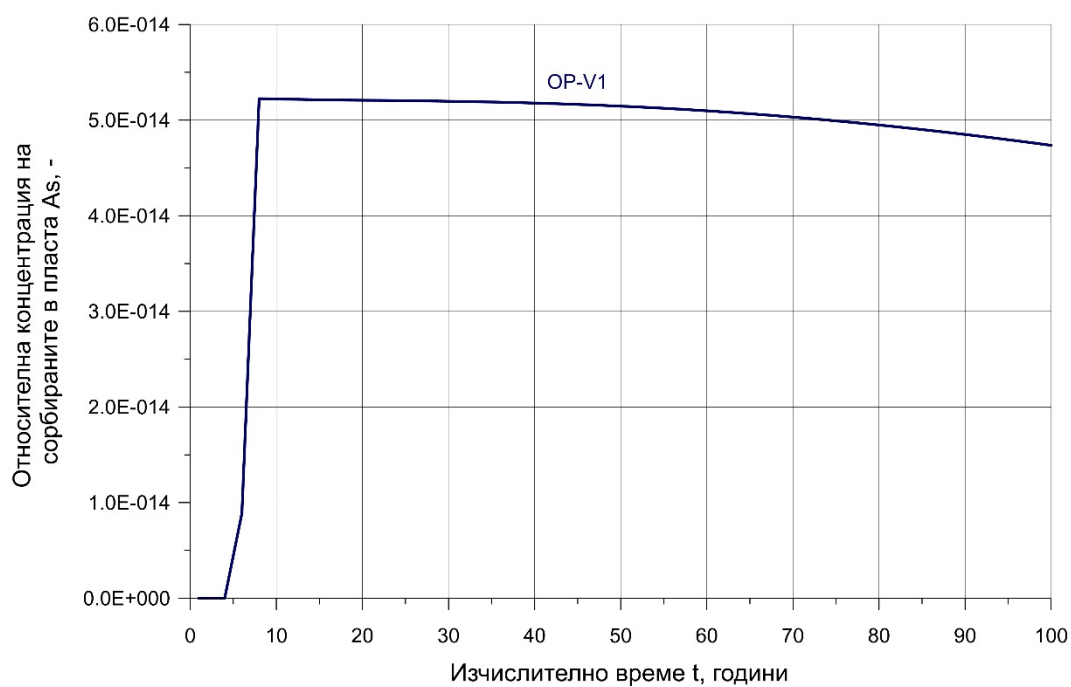
Фиг. 58. Модел MTM- As. Изменение на относителната концентрация на As в подземните води под дъното на хвостохранилището – пунктове OP-H1, OP-H2, OP-H3, OP-H4 и OP-H5.



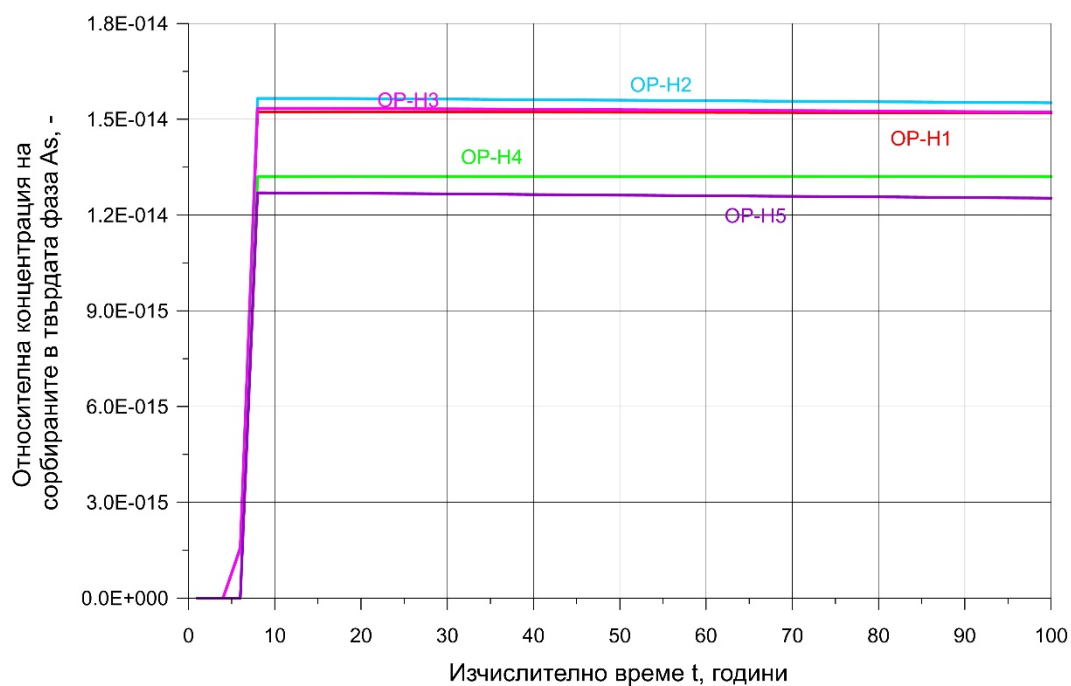
Фиг. 59. Модел МТМ- As. Изменение на относителната концентрация на As в подземните води между потенциалните източници и първия реципиент Дълбоки дол – пунктове OP-P1, OP-P2 и OP-P3.



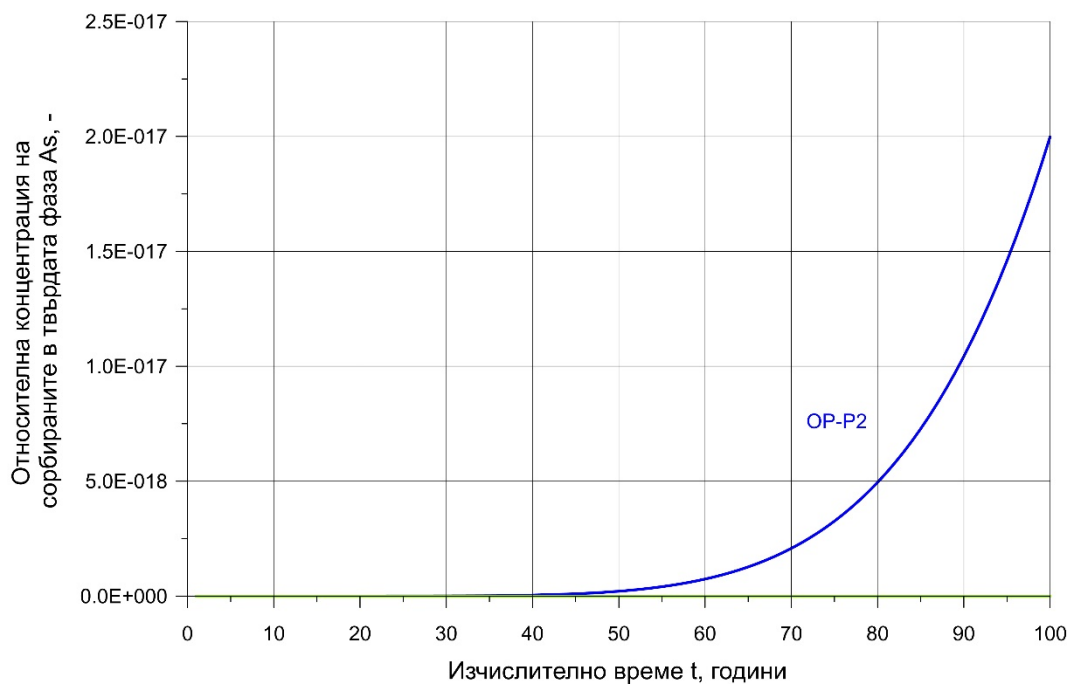
Фиг. 60. Модел МТМ- As. Изменение на относителната концентрация на As в подземните води, които се дренират в Дълбоки дол – пунктове OP-R1, OP-R2, OP-R3, OP-R4, OP-R5, OP-R6 и OP-R7.



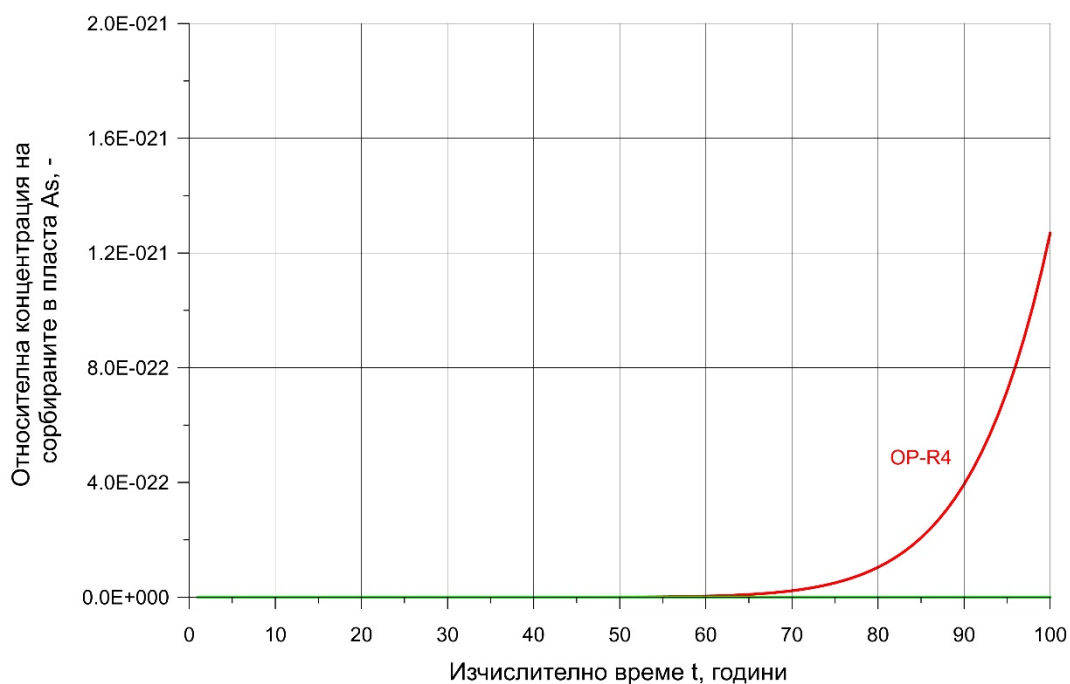
Фиг. 61. Модел МТМ-As. Изменение на относителната концентрация на на сорбирания As в твърдата фаза на водоносния пласт As под контактния водоем – пункт OP-V1.



Фиг. 62. Модел МТМ-As. Изменение на относителната концентрация на на сорбирания As в твърдата фаза на водоносния пласт As под дъното на хвостохранилището – пунктове OP-H1, OP-H2, OP-H3, OP-H4 и OP-H5.



Фиг. 63. Модел MTM-As. Изменение на относителната концентрация на сорбирания As в твърдата фаза на водоносния пласт As между потенциалните източници и първия реципиент Дълбоки дол – пунктове OP-P1, OP-P2 и OP-P3.



Фиг. 64. Модел MTM-As. Изменение на относителната концентрация на сорбирания As в твърдата фаза на водоносния пласт As по десния бряг на Дълбоки дол – пунктове OP-R1, OP-R2, OP-R3, OP-R4, OP-R5, OP-R6 и OP-R7.

3.4. Обобщение на резултатите от моделните изследвания. Основни изводи.

Посредством проведените моделни изследвания е разгледан подробно консервативният сценарий, който изключва действието на част от инженерните бариери за възпрепятстване изпускането на течни емисии под дъното на хвостохранилището и повърхностния водоем. С разработените модели са проиграни два варианта за отчитане ролята на инженерните бариери. Първият от тях, който е основен и много по-консервативен, изследва съвместното действие на уплътнения пласт валирана глина в основата на двете съоръжения и на долния изолиращ екран (ГИЕ) под дъното на хвостохранилището без наличие на предвидената в проекта хидроизолационна геомембрана (HDPE). Вторият вариант включва наличие на такава геомембрана под дъното и бортовете и на двете съоръжения, за която при изчисленията бе направено допускане, че не е напълно водонепроницаема, което е гарантирано от спецификациите на производителя.

Комплексният анализ на получените моделни решения дават основание да се направят следните по-важни обобщения и изводи относно възможното въздействие върху подземните и повърхностните води на системата за управление на отпадъците от преработването на полезните изкопаеми от находище „Милин камък“ по време на нейната експлоатация и в периода след закриване на добива:

1. При екстремното допускане, че от предвидените в проекта инженерни бариери са изградени единствено уплътненият пласт валирана глина и дренажният слой под хвоста (без наличие на водонепроницаеми геомембрани под двете съоръжения), може да се очаква следното развитие, обхват и интензивност на процесите на навлизане и миграция на замърсители в подповърхностното пространство.
 - Средната скорост на инфилтрационния поток под дъното на потенциалните източници е по-висока в активната фаза на експлоатацията – около $6,1 \cdot 10^{-5}$ m/d. Впоследствие, след прекратяване на добива и рекултивирането на терена рязко спада с 1-2 порядъка. Налице е реално „запечатване“ на заетата от двете съоръжения площ, което минимизира възможностите за инфилтрация на валежни води през тялото на хвостохранилището.
 - Относителната концентрация на SO_4 в инфилтрационен поток при навлизането му в подземните води е динамична величина. Подобно на скоростта на потока, нейните стойности достигат своя максимум в периода на изграждане на хвостохранилището, когато достига и до $7,5 \cdot 10^{-1}$. След рекултивацията намалява с около един до два порядъка, а 10 г. след закриване на добива е съвсем незначителна – от $3,9 \cdot 10^{-7}$ до $5,1 \cdot 10^{-4}$, средно – $2 \cdot 10^{-4}$.
 - Слабо подвижният As почти изцяло се задържа в депонирания отпадък (кека) и зоната на аерация. До подземните води достига като инцидентни локални пробиви, при това с изключително ниска относителна концентрация в инфилтрационния поток - между $1,4 \cdot 10^{-8}$ и $1,2 \cdot 10^{-12}$.
 - Навлизащите в подземните води SO_4 и As мигрират по посока на подземния поток, като маркират границите на въздействие върху подземните и повърхностните води. В резултат на хидродисперсия и смесване с чистите пластови води тяхната относителна концентрация допълнително намалява с няколко порядъка.
 - Зоната на възможно въздействие, очертана от SO_4 , обхваща една много малка част на горния водопроницаем пласт, в чиито граници попада района на хвостохранилището и контактния водоем и прилежащата им територия до дере Дълбоки дол. Относителната концентрация на SO_4 в тази зона е твърде ниска, най-често в интервала от $2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$, с тенденция да намалява във времето.

- Присъствието на следи от As в подземните води е съвсем ограничено. Стойностите на относителната концентрация са нищожни и без практическо значение – най-често между 1.10^{-19} и 2.10^{-15} .
 - Зоната с повишено съдържание на SO_4 ще достигне до дере Дълбоки дол след приблизително 25 г. Замърсените подземни води ще се оттичат на фронт с дължина около 200-250 m. Сумарното количество на дрениращите се води е незначително, а относителната концентрация на SO_4 много ниска – от $1.0.10^{-4}$ до $1.2.10^{-3}$.
2. Добавянето на хидроизолационната геомембрана над уплътнения пласт валирана глина напълно възпрепятства проникването на течни емисии под дъното на хвостохранилището и контактния водоем по време на активната експлоатация и до края на прогнозния период от 100 г. Моделните решения показват категорично нулев инфилтрационен поток под втората бариера и пълно задържане на замърсителите във филтрирания отпадък.
 3. Коментираните по-горе резултати дават основание да формулираме извода, че дори при отсъствие на част от инженерните бариери, въздействието върху подземните и повърхностните води на системата за управление на отпадъците от преработването на полезните изкопаеми от находище „Милин камък“ ще е незначително.

Забележка: Необходимо е да направим едно важно пояснение относно значението на величината „относителна концентрация“, която използваме в количествените оценки и прогнози относно разпространението на SO_4 и As в зоната на аерация и водоносния пласт. Както вече отбелязахме тя представлява отношението на „текущата“ концентрация C_i в определен момент t_i и място x_i, y_i, z_i към входната концентрация C_0 на съответния замърсител. Ако знаем абсолютната стойност на C_0 в потенциалния източник, то лесно може да изчислим и абсолютните стойности на C_i във всяка друга точка от моделната област. Например, по аналогия с данни за химичния състав на руднични води и инфилтрат от действащи рудници и хвостохранилища в района на Средногорието може да приемем, че максималните стойности на концентрацията на SO_4 и As в източниците са съответно $C_0^{SO_4} = 8000 \text{ mg/L}$ и $C_0^{As} = 30 \text{ mg/L}$. Тогава, съобразно резултатите от моделните изследвания се получава, че концентрацията на SO_4 в зоната на възможно въздействие между източниците и Дълбоки дол варира в диапазона от 2 до 40 mg/L, т.е. действително е твърде ниска. По същия начин, следите от As в подземните води като абсолютна стойност са в диапазона 3.10^{-15} и $6.10^{-11} \text{ } \mu\text{g/L}$ или съвсем нищожни и практически невъзможни за регистриране.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направената дългосрочна прогноза за развитието, пространствените параметри и степента на възможно въздействие или замърсяване на подземните и повърхностните води от системата за управление на отпадъците от преработването на полезните изкопаеми от находище „Милин камък“, гр. Брезник се базира на разработените поредица от едномерни и тримерни числени модели, в които са отчетени най-важните природни и инженерни условия на площадките на основните съоръжения (хвостохранилище и контактен водоем), както и на района в по-общ план.

Генералното заключение, което следва от детайлния анализ на всички резултати от моделните изследвания е, че **изпълнението на предложената нова технология за изграждане и експлоатация на основните съоръжения не създава реална опасност от замърсяване на подземните и повърхностните води в района на обекта през целия период на неговата експлоатация (активна и пасивна).**

Литература

- Гълъбов М., Н. Стоянов. 2005. Динамика на подземните води. С., ИК "В. Недков", 202 с.
- Гълъбов, М., И. Йотов, П. Пенчев, Н. Стоянов, К. Щерев. 1999. Определяне ресурсите на подземните води (методическо ръководство). МОСВ, С., 175 с.
- Маринова, Р., В. Гроздев, Д. Иванова, Д. Синьовски, И. Петров, П. Милованов, А. Попов. 2010. Обяснителна записка към геоложката карта на Р. България М 1:50000, Картен лист К-34-46-г (Брезник), МОСВ, С., 63 с.
- Пенчев П., С. Борисов, Б. Великов, А. Лаков, К. Спасов. 1990. Хидрогеология и основи на инженерната геология. С., ДИ Техника, 342 с.
- Стоянов Н. 2003. Оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от депа за твърди битови отпадъци. Дисертация, С., МГУ, 215 с.
- Стоянов, Н. 2018. Хидрогеоложки доклад за проведени проучвания на обект: Хвостохранилище по проект „Брезник“, находище „Милин камък“, гр. Брезник. Геотехника АБС.
- Стоянов, Н. 2018. Хидрогеоложки доклад за проведени проучвания на обект: Контактен водоем по проект „Брезник“, находище „Милин камък“, гр. Брезник. Геотехника АБС.
- Стоянов, Н. 2019. Математическо моделиране в хидрогеологията. ИК "Ваньо Недков", София, 245 с.
- Стоянов, Н. 2023. Хидрогеоложки доклад за проведени проучвания на обект: Допълнителни инженерно-геоложки, хидрогеоложки и геотехнически проучвания в зоната на хвостохранилището и контактният водоем, по проект „Брезник“, находище „Милин камък“, гр. Брезник. Част: Хидрогеоложко проучване. Геотехника АБС.
- Христов, А., А. Лаков. 2023. Инженерногеоложки доклад за проведени проучвания на обект: Допълнителни инженерно-геоложки, хидрогеоложки и геотехнически проучвания в зоната на хвостохранилището и контактният водоем, по проект „Брезник“, находище „Милин камък“, гр. Брезник. Част: Инженерногеоложко проучване. Геотехника АБС.
- Adams E. E., L. W. Gelhar. 1992. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer. 2. Spatial moments analysis. *Water Resour. Res.*, 28 (12), 3293-3307.
- Anderson M. P., W. W. Woessner, R. J. Hunt. 2015 (2 Ed.). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Elsevier, Academic press, 720 p.,
- Bear J. 1979. *Hydraulics of groundwater*. New York, McGraw-Hill, 569 p.
- Bredenkamp D. B. 1990. Quantitative estimation of groundwater recharge by means of a simple rainfall-recharge relationship. – In: D. Lerner, A. Issar, I. Simmers (eds.). *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge*, IAH Memoir, Vol. 8, 247-256.
- Permitting design report for dry stack tailings storage facility Breznik Gold Project. 2023. Project No. 22-92-01 Rev A, The Mines Group, Inc., 84 p.
- Brooks R.H., and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media: Fort Collins, Colorado State University Hydrology Paper no. 3, 27 p.
- Carsel, R. F., & Parrish R. S. (1988). Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics. *Water Resource Research*, 24, 755-769. <https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755>.
- Castany, G. 1968. *Prospection et exploitation des nappes souterraines*. Dunod, Paris, 718 p.

- Gelhar L. W., C. Welty, K. R. Rehfeldt. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 28(7), 1955-1974.
- Enviro Base v.2.0 – Софтуерен продукт на Waterloo Hydrogeologic Inc., Ontario Canada.
- Javandel I., C. Doughty, C. F. Tsang. 1984. Groundwater transport: Handbook of mathematical models. American Geophysical Union Water Resources Monogram 10, 228 p.
- Harbaugh A. W., M. G. McDonald. 1996. User's documentation for Modflow-96, an update to the USGS modular finite-difference ground-water flow model. Open-File Report 96-485, USGS.
- Harbaugh A. W., E. R. Banta, M. C. Hill, M. G. McDonald. 2000. Modflow-2000, the USGS modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process. Open-File Report 00-92, USGS.
- Harbaugh A. 2005. Modflow-2005, The USGS modular ground-water model - the ground-water flow process: U.S. Geological Survey Techniques And Methods 6-A16.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985) Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *App. Eng. in Agriculture*, 1, 96-99. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>
- Haverkamp R., M.Vauclin, J.Tovina, P.J.Wierenga, G. Vachaud. 1977. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration: *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 41, p. 285-294.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. New York, Academic Press, 413 p.
- McDonald G., A. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Techniques of Water Resources Investigations of the USGS*, Book 6-A1. 586 p.
- Philip J.R. 1958. Theory of infiltration. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, v.83, 5-6, 1957; v.84, 2-3-4.
- Richards L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, No1.
- Schaap, M.G., F.J. Leij, M.Th. van Genuchten. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. – *Journal of Hydrology*, 251, 163–176.
- Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, M.Th van Genuchten. 2008. *The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media*. Version 4.0. HYDRUS Software Series 3, Riverside California: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 315 pp.
- Spitz K., J. Moreno. 1996. *A practical guide to groundwater and solute modeling*. JW&S, Inc., NY, 460 p.
- USDA. 1987. *Soil mechanics level I. Modul 3 - Textural soil classification*. Study Guide. 48 p.
- van Genuchten M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Soc. of Amer. Proceedings*, v. 44, no. 5, p. 892-898.
- Zheng C., G. D. Bennet. 2002 (2 Ed.). *Applied contaminant transport modeling: Theory and practice*. J&WS, NY, 440 p.
- Zheng C., P. P. Wang. 1999. MT3DMS – A modular 3-D multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems (Release DoD_3.50.A). *Dep. of geol. and math., Univ. of Alabama*, 239 p.