



**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ
“СВ. ИВАН РИЛСКИ”**

**ГЕОЛОГОПРОУЧВАТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА “ИНЖЕНЕРНА ГЕОЕКОЛОГИЯ”**

инж. маг. Сотир Каменов Плочев

**МОДЕЛИРАНЕ НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО НА ЗАМЪРСИТЕЛИ
В ЗОНАТА НА ПРОТИВОФИЛТРАЦИОННА ЗАВЕСА**

АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД
за присъждане на образователната и научна степен “доктор”
по научна специалност
“Системи и устройства за опазване на околната среда”

НАУЧЕН КОНСУЛТАНТ:

/проф. д-р Николай Стоянов/

София, Октомври 2021

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Инженерна геоекология“ към Геологопроучвателния факултет на Минно – геоложкия университет „Св. Иван Рилски“ на 24.09.2021г., съгласно Ректорска заповед № Р -690/ 15.09.2021г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № Р - 755/04.10.2021г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на 10.12.2021г., от 13.30 часа в зала 204Б на Миннотехнологичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. проф. д-р Стефан Сотиров Димовски- МГУ, кат. ПГ (вътрешен)
2. проф. д-р Алексей Димитров Бендерев- ГИ-БАН (външен)
3. проф. д-р Марияна Костадинова Николова -НИГГГ- БАН (външен)
4. доц. д-р Петър Николов Гергинов- ГИ-БАН (външен)
5. доц. д-р Георги Железов Георгиев - НИГГГ- БАН (външен)

Резервни членове:

1. Проф. д-р Владимир Христов Христов – ГИ, БАН
2. Доц. д-р Борис Владимиров Вълчев – МГУ катедра ГГИ

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1. проф. д-р Алексей Димитров Бендерев
2. доц. д-р Петър Николов Гергинов

Дисертантът е докторант на самостоятелна подготовка към катедра „Инженерна геоекология“ на Геологопроучвателния факултет .

Автор: маг. инж. Сотир Каменов Плочев

Заглавие: Моделиране на разпространението на замърсители в зоната на противифилтрационна завеса

Тираж: 20 броя

Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски“, София

СЪДЪРЖАНИЕ

| | Стр. |
|--|-------------|
| I. ВЪВЕДЕНИЕ | 4 |
| II. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД | 4 |
| Актуалност на темата | 4 |
| Цел на дисертационния труд | 4 |
| Задачи на дисертационния труд | 4 |
| III. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ | 5 |
| 1. Материали и описание на обекта на изследване | 5 |
| 2. Аналитични методи | 7 |
| IV. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ | 8 |
| 1. Анализ на резултати от екологичен мониторинг на повърхностни дренажни води за обекта в периоди преди и след поставяне на противифилтрационната завеса | 8 |
| 2. Анализ на проекта и реализацията на противифилтрационната завеса в зоната на петата на хвостохранилището | 14 |
| 3. Изследвания за установяване на хидродинамиката на потока при различни варианти на материала в зоната на противифилтрационната бариера | 18 |
| 4. Математически моделни изследвания за прогнозиране на замърсяването на подземните води от хвостохранилище "Челопеч" и оценка на защитната роля на противифилтрационната завеса | 27 |
| V. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ | 50 |
| VI. ПРИНОСИ | 51 |
| VII. ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД | 51 |
| SUMMARY | 52 |

I. ВЪВЕДЕНИЕ

Земната повърхност, земните недра, атмосферата и водата са основни природни ресурси, осигуряващи жизнени условия за възникване, развитие и съществуване на организмите и човека. Замяръсяването има и пряко социално значение, представлява риск за здравето на населението, негативно влияе върху икономиката (туризъм, риболов, селско стопанство). Затова е необходимо не само наблюдение, но и анализ и контрол върху състоянието на атмосферата, повърхностните и подземни води.

Антропогенната дейност на човека е свързана с отделянето на различни по състав и различна концентрация вредни вещества. Наличието на замърсители, надхвърлящи регламентираните стойности, може да доведе до негативни последици в цялата хранителна верига, екосистемите и другите природни ресурси.

II. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на темата

Генерирането на отпадъчни води, замърсени с тежки метали, сулфати, радионуклиди и арсен се счита, че е главния екологичен проблем, свързан с минното дело и преработването на минерални суровини. Основните източници на такива води са откритите рудници и подземните минни изработки, насипищата от минни отпадъци и бедни извънбалансови руди, отпадъците от преработването на минерални суровини и др. Находищата на минерални и енергийни ресурси, както и редица хвостохранилища са потенциални източници на кисели руднични води, които се характеризират с различно съдържание на сулфидни минерали. Води с такъв химичен състав се формират в повечето европейски страни, особено в тези с добре развити минна и преработваща минерали промишленост. Те са актуелен проблем за територията на България и към тяхното генериране се включват и закритите обекти от последните години (над 65 бр.), както и тези, които ще бъдат закрити в близко бъдеще.

Значителния брой на подобни случаи в световната практика и екологичната значимост по отношение рискове за околната среда, определят актуалността на представения дисертационен труд и неговото значение.

Цел на дисертационния труд

Основна цел на дисертационния труд е да се направи анализ на разпространението на замърсители типични за минно-добивната индустрия, присъстващи в подземните и повърхностни води в зоната на противифилтрационна завеса, разположена след стена на хвостохранилище за минни отпадъци. При изследванията да се изходи от конкретния пример на находище "Челопеч".

Задачи на дисертационния труд:

1. Да се направи характеристика на изследвания обект по отношение геология, хидрогеология, хидрология, климатични фактори и др.
2. Да се направи анализ на резултатите от екологичния мониторинг на повърхностни дренажни води за обекта в периоди преди и след поставяне на противо-филтрационната завеса.
3. Да се проучи и анализира, направената реализация на проекта на противо-филтрационната завеса в зоната на петата на хвостохранилище.

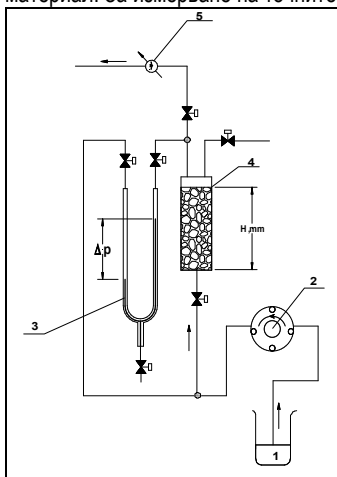
4. Да се изследва хидродинамиката на потока при преминаването му през материали с различни филтрационни свойства.
5. Да се направи анализ на математическия модел на разпространението на замърсителите в зоната на хвостохранилище за минни отпадъци и на тази база да се установи влиянието на противифилтрационната завеса върху миграцията на замърсителите.разположена след стена на хвостохранилище за минни отпадъци.

III. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

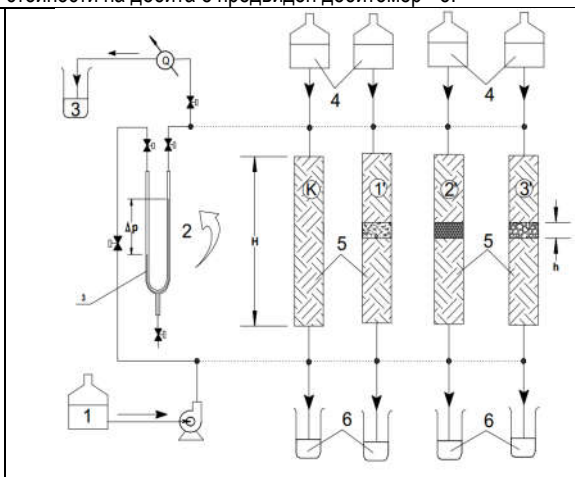
1. Материали и описание на обекта на изследване

1.1. Лабораторна инсталация за изследване хидродинамиката на потока в проби от зоната на противифилтрационната бариера.

За установяване хидродинамиката на потока през обема на материала е направена опитна установка (фиг. 1). Същата представлява херметично затворена стъклена колоната – 4, запълнена с изследвания материал (пр. чакъл и варовик или смес на двата материала), през която чрез перисталтична помпа - 2, от ذخарнаващ съд - 1 се подава вода в колоната. Посредством U-образен диференциален манометър – 3, се измерва разликата в наляганията на вход и на изход на колоната при различни дебити (респ. скорости) на потока и различни нива на запълване с инертен материал. За измерване на точните стойности на дебита е предвиден дебитомер - 5.



Фигура 1. Схема на опитната установка за установяване на хидродинамиката на потока при различен вид на пълнежния материал



Фигура 2. Схема на опитната инсталация за изследване на коефициента на местни съпротивления

Легенда: 1 - Захранващ съд за измервана на хидравличните загуби, 2 - Диференциален манометър, 3 - колекторен съд, 4 - Захранващ съд с разтвор, 5 - Колони с различен тип пълнеж (K - контрола с почва, 1'- почва със слой от варовик, 2'- почва със слой от зеолит, 3'- почва със слой от бентонит), 6 - колекторни съдове за преминал през колоните разтвор.

1.2. Лабораторна инсталация за изследване на коефициента на местни съпротивления

За целите на изследванията е използвана опитната инсталация за измерване стойността на коефициента на местни съпротивления чрез установяване на хидравличното съпротивление на материала при различни условия (фиг. 11), състояща се от четири колони от плексиглас с размер височина 0,6 m и вътрешен диаметър 12 cm. Във всяка колона са поставени изветрели гнайси взети от зоната на противофилтрационната завеса. Взети са проби от два шурфа, като първия е от повърхностния слой.

Опитите са проведени в четири варианта на колони:

Контрола - изветрели гнайси - 1,6 kg;

Вариант 1 – изветрели гнайси – 1,1 kg и слой варовик $[CaCO_3]$ с маса 0,5 kg със зърнометрия от 5 до 20 mm), разположен в средната част на колоната;

Вариант 2 – изветрели гнайси – 1,25 kg и слой зеолит $[M_xAl_xSi_{1-x}O_2 \cdot nH_2O - Na_2Al_2Si_3O_{10} \cdot 2H_2O]$ с маса 0,35 kg със зърнометрия от 2 до 5 mm), разположен в средната част на колоната;

Вариант 3 – изветрели гнайси – 1,40 kg и слой бентонит - глина съставена главно от монтморилонит $[(Na,Ca)_{0,33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}OH_2 \cdot nH_2O]$ с маса 0,20 kg, прахова фракция (насипна плътност 1,069 g/cm³), разположен в средната част на колоната.

През колоните са пропускани дестилирана вода и три вида моделни разтвори:

Разтвор-1, съдържащ SO_4 - 1 g/l; Fe - 30 mg/l; Mn - 5 mg/l;

Разтвор-2, съдържащ SO_4 - 2 g/l; Fe - 100 mg/l; Mn - 10 mg/l;

Разтвор-3, съдържащ SO_4 - 2 g/l; Fe - 500 mg/l; Mn - 20 mg/l;

Сулфатите, Fe и Mn в моделните разтвори са под формата на $MgSO_4 \cdot 7H_2O$; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ и $MnSO_4 \cdot H_2O$.

Във всяка колона са пропускани трикратно по 1250 ml дестилирана вода и моделни разтвори. От моделен разтвор 3 през всяка колона допълнително 5-кратно са пропуснати 25 l.

На изходящите от колоните води са измервани параметрите pH, концентрация на сулфати, желязо и манган.

1.3. Описание на обекта на изследване – хвостохранилище Челопеч и конкретния обект на изследването

Обект на изследването е хвостохранилище "Челопеч" и по специално зоната на "петата", намираща се в южната част на хвостохранилището.

За отвеждането на отпадъчните води е изпълнена разделна канализационна система, като са обособени три потока:

- **Поток № 1.** Битово – фекални отпадъчни води, зауствани без пречистване в Чуговишко дере, което се включва в р. Воздол, приток на р. Тополница, поречие Марица;

- **Поток № 2.** Отпадъчни води от топлосилов цех и автомивка

Тези води след механично пречистване през хоризонтален утайтел и каломаслоуловител се заустват в Чуговишко дере, а то на свой ред в р. Воздол, която е приток на р. Тополница;

- **Поток № 3.** Избистрени води от хвостохранилище "Челопеч", заустващи се в Чифлик дере, приток на р. Тополница;

Система от дренажи в петата на основната стена на хвостохранилището дренират тялото и улавят филтрациите замърсени води. Събраните води се връщат чрез дренажна помпена станция отново в чашата на хвостохранилището.

Избистрените води оформят водно огледало в източната част на хвостохранилището и посредством скатов преливник изграден на левия скат на Чифлик дере водата постъпва в помпена станция. По голяма част (85%) от избистрените води се използват като оборотни. Само малко количество (7+9%) избистрени води се заустват в Чифлик дере, приток на р. Тополница.

В периода 04.2012г. - 10.2014г. беше проведен екологичен мониторинг и бяха анализирани различни показатели съобразно Наредба № Н-4 за характеризиране на повърхностните води. За норми бяха взети определените от наредбата физикохимични показатели за качество за повърхностен воден обект тип полупланинска река, каквито би следвало да са реките около Челопеч, според критерии определени от същата наредба (включват се електропроводимост, нитратен азот, нитритен азот и амониен азот), както и с Приложение към 7, чл. 12 , ал. 4 – Стандарти за качество за специфични замърсители (включват се показателите манган, желязо, мед, цинк, шествалентен хром и арсен). Последните се лимитират като средногодишни стойности (СГС).

1.3.1 Описание на обекта на изследване – хвостохранилище Челопеч. Местоположение.

Находище „Челопеч“ се намира в централната част на най-западната от Подбалканските котловини - Златишко-Пирдопската котловина. Терена, върху който са изградени минния комплекс и експлоатационните съоръжения на “Дънди Прешъс Металс Челопеч” ЕАД, са разположени в основата на южните склонове на източната част на Етрополска Стара планина и северния район на Златишкото поле, част от Златишко–Пирдопската котловина. Общата площ, собственост на дружеството е приблизително 167 ha, от които 156 ha се използват за индустриални цели. Извън територията на дружеството са разположени две вентилационни шахти (Изток и Север), хвостопровод, хвостохранилище “Челопеч”, взривен склад и пречиствателна станция за отпадни води.

Теренът се характеризира с ниски хълмове със заоблени била, формирани в резултат на ерозионни процеси в подножията на планините. Златишкото поле е прорязано от р. Тополница и нейните притоци. Във водосборната област на река Воздол са рудника, производствени и административни сгради на Дружеството. Язовир "Качулка" е изграден на р. Воздол, като коритото на реката е поместено на запад до Чуговишко дере. Хвостохранилището е изградено на около 4 km южно от основните съоръжения на “Дънди Прешъс Металс Челопеч” ЕАД и се намира във водосбора на река Чифлик дере, близо до вливането му в река Тополница.

2. Аналитични методи

В определени точки на лабораторните инсталации са измервани параметрите pH и Eh, mV. В същите точки на опробване са определяни спектофотометрично концентрациите на: сулфати, сероводород, нитрати, нитрити, амониени йони и химичнопотребен кислород.

2.1. Химични анализи на водни проби

- Количествено определяне на сулфати – със SPEKOL 11 при дължини на вълната 420 nm, чрез използване на BaCl₂ за спектрофотометрично измерване на мътноста на пробата в резултат на получена бяла утайка от BaSO₄;
- Количествено определяне на нитрати – спектрофотометрично при дължини на вълната 410 nm с използване на реактив натриев салицилат;
- Количествено определяне на амониени йони - спектрофотометрично при дължини на вълната 420 nm по метода на Неслер;
- Количествено определяне на нитрити – спектрофотометрично при дължина на вълната 543 nm с използване на реактив N-(1-нафтил) етилен диаминдихлорид;
- Химично потребен кислород (ХПК) – фотометрично чрез Spectroquant Merck;
- Концентрация на тежки метали – ICP-AES спектроскопия – метод EPA 6010C.
- Химичните анализи на течните проби за определяне на манган бяха осъществени съгласно модифициран спектрофотометричен формалдехиден метод (Goto, K., at all, 1962).

Таблица 1. Използвани методи за анализ на водни проби

| Параметър | Стандарт | |
|-------------------------------|----------|---|
| ХПК | ISO | Spectroquant Merck |
| Киселинност | ISO | EN 9963-2 |
| Алкалност | ISO | EN 9963-1 |
| SO ₄ ²⁻ | БДС | 17.1.4.03 - 77 |
| Концентрация на тежки метали | ISO | ICP-AES спектроскопия – метод EPA 6010C |
| Fe | БДС | ISO 6332:2002 |

Контролирани са T⁰, pH, Eh, pO₂, и TDS (общо съдържание на разтворени соли) съответно посредством потенциометрични методи измервани с портативни уреди на тип "Hanna" HI 3021, HI 9032 и HI 7035. Направени са и пълни катионни анализи на ISP, като по отношение на резултатите от Mn от спектрофотометричния анализ бяха сравнявани с данните получени при ISP анализа.

Концентрацията на разтворените метали и арсен, е определяна посредством ICP-спектрофотометрия - метод EPA 6010C. Концентрацията на сулфатите (табл. 15) е измервана спектрофотометрично чрез използване на BaCl₂ (*Frederick et al., 1996*). Концентрацията на разтворен кислород е измерван посредством полярографски датчик модел PE40xi. Количеството на разтворената органични вещества е определяно посредством измерването на ХПК чрез спектрофотометричен тест на Merck.

IV. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

1. Анализ на резултати от екологичен мониторинг на повърхностни дренажни води за обекта в периоди преди и след поставяне на противифилтрационната завеса

В зоната на петата на хвостохранилище "Челопеч" в периода 2013-2014г., бяха изследвани три вида води - рециркулиращи дренажни води преминаващи през помпената станция, инфилтрирани скатови води и повърхностни скатови води, които естествено подхранват "Чифлик дере". Рециркулиращите дренажни води преминаващи през помпената станция, реално нямат контакт с околната среда, защото са организирани през тръбопровод в затворена схема към хвостохранилището.

По време на провеждане на мониторинговите изследвания се извършваше и изграждане "Противифилтрационна завеса", точно в зоната на петата на хвостохранилището до помпената станция. Поставянето на това съоръжение в значителна степен би способствало за ограничаване на потока на инфилтрираните води към водния поток на Чифлик дере. Ролята на тази противифилтрационна завеса може да бъде оценена, както по отношение промяна на хим. състав на водите така и по отношение дебита на водите в Чифлик дере.

От друга страна, в зоната на изследване съществуват редица данни за екологичен мониторинг от предишни периоди - 2011 и 2012г. на повърхностни и подпочвени води. Освен това беше проведен и екологичен мониторинг на водите от обследвания участък през месеците Април до Ноември за 2013г. и Март до Октомври за 2014г. Този период обхваща времето преди изграждане

(04-06.2013) на противофилтрационната завеса, поставянето и (06-12.2013) и функционирането и след това (01-10.2014).

Събраните данни от екологичния мониторинг в зоната на петата на хвостохранилище "Челопеч" през различни в климатично отношение периоди, могат да послужат за изготвяне на оценка на ефективността на работа на противофилтрационната завеса и за дефиниране на входните параметри на хидрогеоложкия модел на разпространението на замърсителите преди и след поставяне на противофилтрационната завеса. На база на тези данни може да се оцени до каква степен може се ограничи разпространението на типичните замърсители (SO_4 , Mn, Fe и др.) по пътя на повърхностните води по "Чифлик дере" към р. Тополница. Посредством автоматизирана системата за измерване на количествените и качествени характеристики на водите на р. Тополница се осъществява непрекъснат мониторинг на мътност на водите и на дебита..

При проведени собствени мониторингови изследвания (в периода 2013-2014г.) в зоната на петата на хвостохранилище "Челопеч", са анализирани води от различни мониторингови пунктове (фиг. 3) – рециркулиращи дренажни води през помпена станция (точка А4) към хвостохранилището, скатови води от Чифлик дере (точка А1), води от р. Тополница (А5 и А6) и смесен поток на скатови и инфилтрирани скатови води захранващи Чифлик дере (точки А2 и А3). Измерения дебит на смесените скатови води (в момента на опробване) отвеждани в събирателна централна тръба в зоната на петата на хвостохранилището варираше в диапазона 0,95 до 1,15 dm^3/s . При проведените изследвания на повърхностните води извършени през периода - м. Март 2013г. до м. Октомври 2014г., е установена динамиката в дебитите и в стойностите на основните хим. показатели при различни климатични условия. В това отношение за целия период на екологичен мониторинг се констатираха два, различни в климатично отношение, времеви интервала. Първия период (от м. Февруари 2013 до м. Март 2014г.), се установи сравнително ниско ниво на средно месечните валежи при типични стойности на температурите през различните сезони. През втория период (от м. Април 2014г. до м. Октомври 2014г.), се установи превишения на средно месечните валежи до над 2 до 3 пъти спрямо средните стойности. За да се оцени да каква степен се оказва въздействие върху стойностите на някои основни хим. показатели по време на мониторинга е проследена динамиката на температурата и валежите до 1 месец, преди всяко взимане на проби, като данните са представени на фиг. 4 и 5.

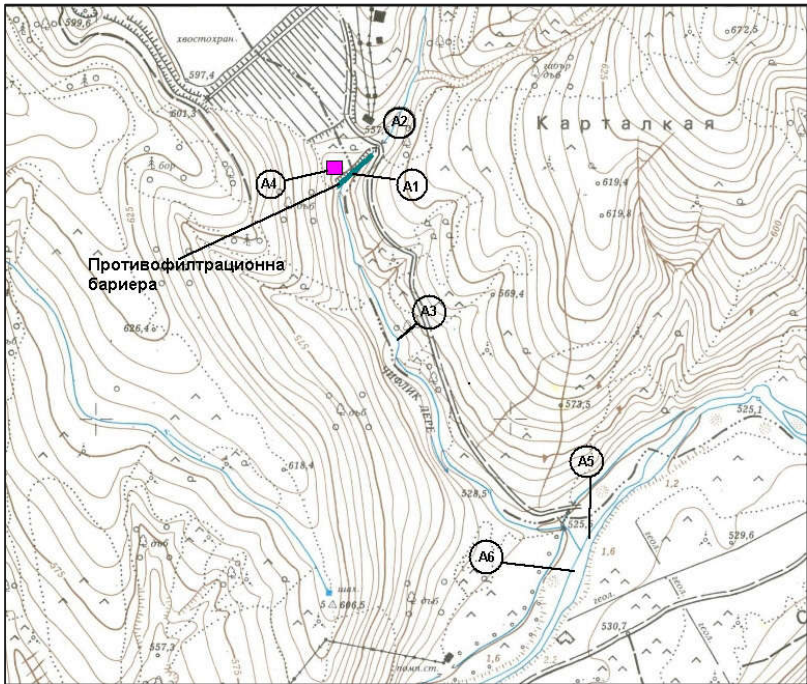
Химическите анализи на проби при проведения екологичен мониторинг от скатови води, рециркулиращи хвостови води и повърхностни води от "Чифлик дере", взети от зоната на петата на хвостохранилище "Челопеч", са установени стойности, както следва:

- установяват се завишени стойности на електропроводимост вариращи в границите $\mu\text{S}/\text{cm}$ 1660 ÷ 3210 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- установяват се завишени стойности на SO_4 в почти всички проби, които варират от 490 mg/l до 1679 mg/l ;
- Mn – превишения на нормите за СГС от 2,2 mg/l до 4,83 mg/l при СГС от 0,05 mg/l ;
- Fe – превишения на нормите за СГС от 5,14 mg/l до 14,5 mg/l при СГС от 0,05 mg/l .

Завишените стойности във водите на Чифлик дере, по отношение концентрациите на Mn, SO_4 , и общо съдържание на разтворени вещества (електропроводимост), вероятно се дължат на естествения завишен геохимичен фон по отношение на тези вещества в района. Последното се потвърждава и от по-стари предходни мониторингови изследвания от 2011 и 2012г.

Дебита на отделните потоци и особено на инфилтриращите се скатови води, през различните периоди на наблюдение се характеризираше със значителни флуктоации, като през летния период достигаше на практика нулеви стойности. С оглед на динамиката в климатичните условия

и осъществяването на различни превантивни дейности по изграждане на противофилтрационна бариера, както и поставянето на нова дренажна система на хвостохранилището, при някои от мониторинговите изследвания са необходими конкретни допълнителни уточнения при взимането на водните проби. При проведения екологичен мониторинг на повърхностните води в зоната на петата на хвостохранилище "Челопеч", преди, по време и след изграждане на противофилтрационната завеса са установени завишени стойности на показателите – електропроводимост (ЕС), сулфати и манган, както и отклонения на показателя рН.



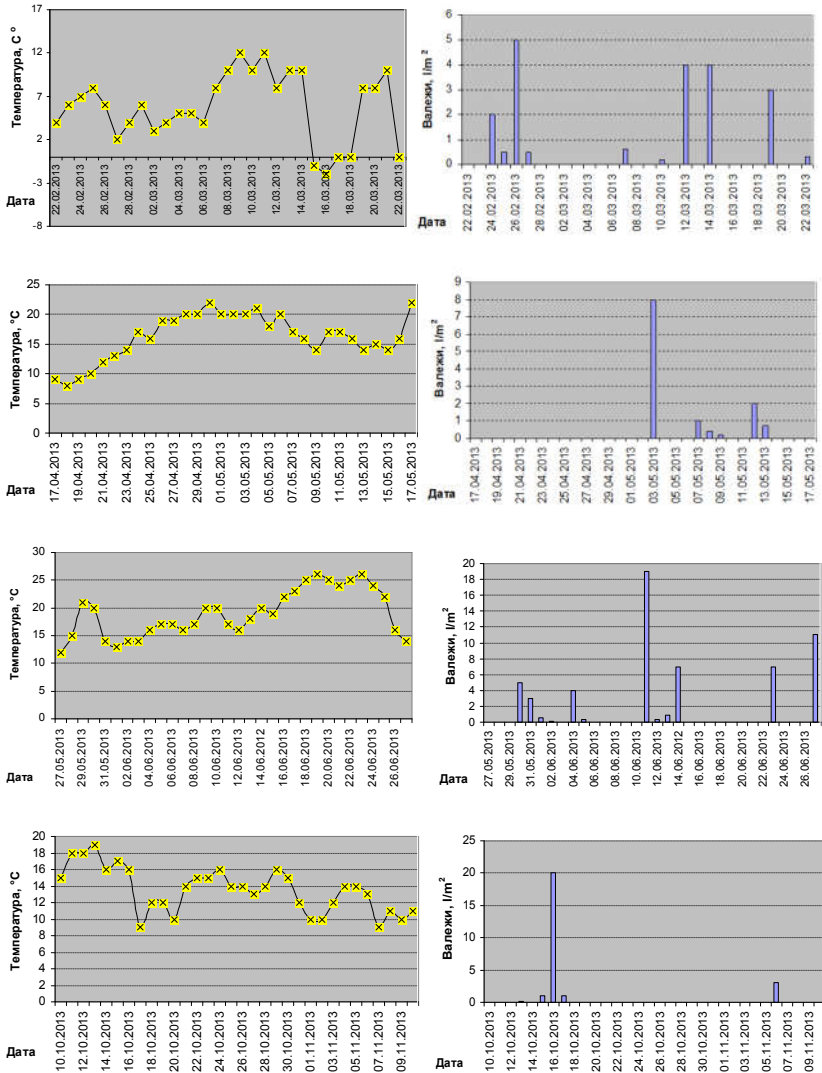
Фигура 3. Карта на района и местоположение на мониторинговите пунктове

Легенда: A1 – Проба от скатови води изтичащи от стената на противофилтрационната бариера, A2 – Чифлик дере (точка преди бариерата в близост до пътя), A3 – Чифлик дере (точка след бариерата на около 250 m по протежение на дерето), A4 – Помпена станция (рециркуляционни дренажни води от помпена станция), A5 – р. Тополница след заустването на Чифлик дере (на 50 m от точката на заустване), A6 – р. Тополница преди заустването на Чифлик дере (на 20 - 30 m преди точката на заустване).

По отношение на останалите параметри - Fe, Cu, Zn и As, са измерени само епизодични еднократно завишени стойности. По отношение от рециркулиращи дренажни води (точка A4) през помпена станция към хвостохранилище "Челопеч" (реално нямащи контакт с околната среда, защото за организирани в затворена схема), се установяват редица по-високи стойности, тези стойности могат да послужат при моделните изследвания за установяване на разпространението на замърсителите в зоната на хвостохранилището, като максимални стойности за различните замърсители.

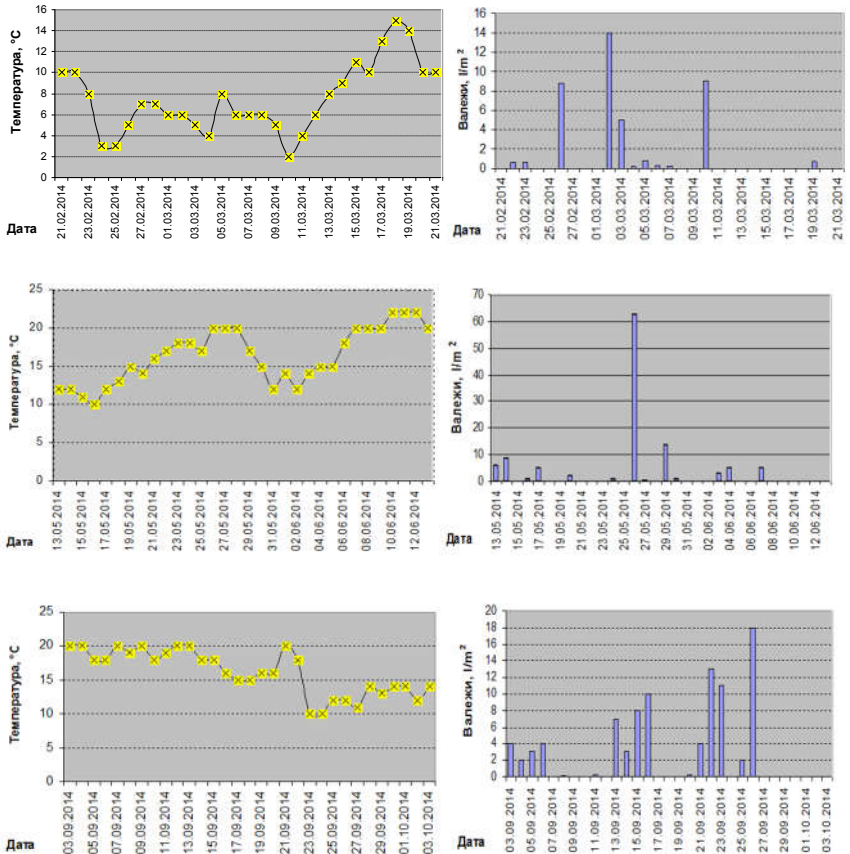
Получените резултати от мониторинга на повърхностните води (фиг. 6) по отношение – електропроводимост, сулфати, манган, желязо, и други тежки метали в периода преди (2013г.) и след поставяне (2014г.) на завесата, показват значително снижение на стойностите им в точките А2 и А3. Същата тенденция се наблюдава и при скатовите води от Чифлик дере (точка А1).

Фигура 4. Данни за климатичните условия при мониторинговите изследвания през 2013 г.

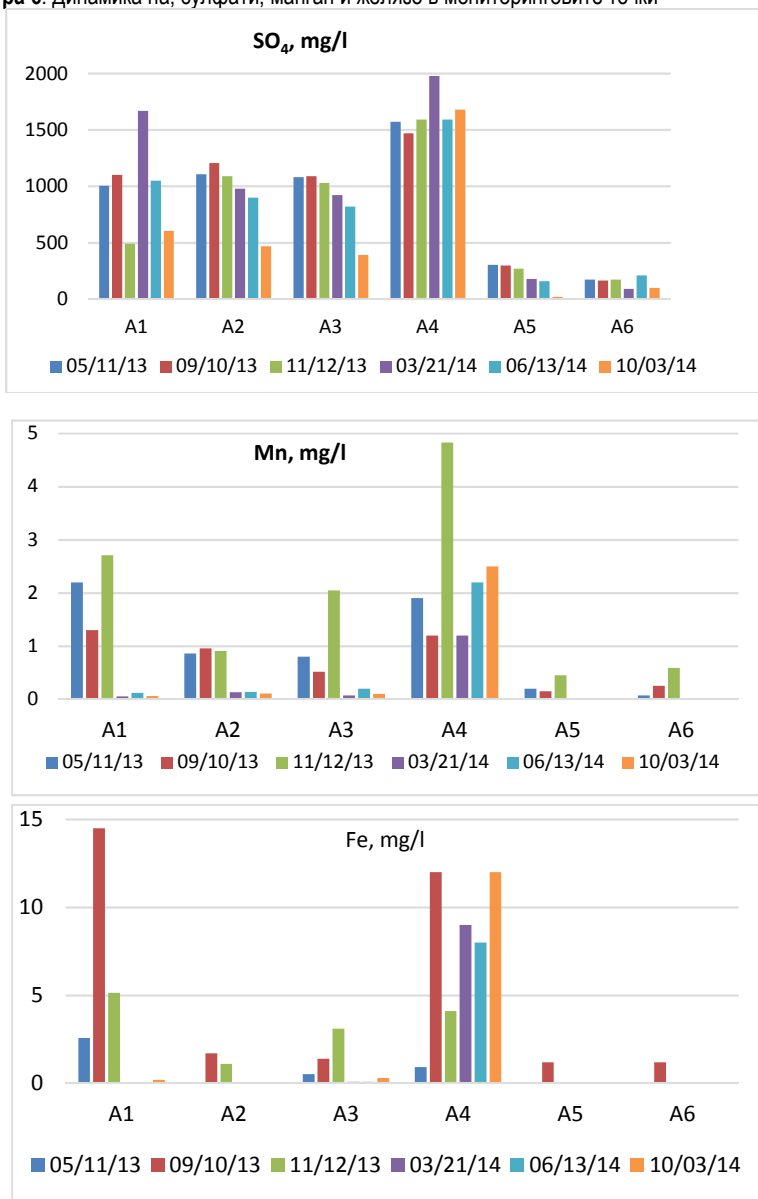


Тези по-ниски стойности се отразяват и по-благоприятно и на водоприемника р. Тополница (точка А6), където се установява понижаване на стойностите на тези показатели през 2014. Това вероятно се дължи, както на поставянето на противополтрационната бариера в зоната на петата на востохранилището, така и на значително по-голямото количество на валежи през 2014г. (фиг. 4 и 5).

Фигура 5. Данни за климатичните условия при мониторинговите изследвания през 2014 г.



Фигура 6. Динамика на, сулфати, манган и желязо в мониторинговите точки



Изводи от проведения екологичен мониторинг на повърхностните води в периода 2013-2014г.:

1. Геоложката и хидрогеоложка характеристика на района предполагат наличие на различни източници на подземни и повърхностни води, като в зависимост от конкретните условия, качествата на повърхностните води могат да бъдат повлияни.

2. Управлението на водите обезпечава екологосъобразното управление на обекта и възможност за непрекъснат контрол върху качествата на водите.

3. Получените резултати от мониторинга на повърхностните води по отношение – електропроводимост, сулфати, манган, желязо, и други тежки метали в периода преди (2013г.) и след поставяне (2014г.) на завесата, показват значително снижение на стойностите им в точките А2 и А3. Същата тенденция се наблюдава и при повърхностните води от Чифлик дере (точка А1). Тези по-ниски стойности се отразяват и по-благоприятно и на водоприемника р. Тополница (точка А6), където завишаване на стойностите на тези показатели през 2014г. не се наблюдава. Това вероятно се дължи както на поставянето на противифилтрационната бариера в зоната на петата на хвостохранилището, така и на значително по-голямото количество на валежите през 2014г.

4. Предприетите действия за реализация на противифилтрационна завеса в зоната на петата на основната стена на хвостохранилището в значителна степен се очаква да ограничат инфилтрацията на води от хвостохранилището.

2. Анализ на проекта и реализацията на противифилтрационната завеса в зоната на петата на хвостохранилището

2.1. Противифилтрационна завеса

Местоположението и характеристиката на обекта са подробно описани в глава 3 – Материали и методи.

След хвостохранилището, замърсените от хвоста води проникват в пукнатините на скалната основа и замърсяват водите на реката. Противифилтрационната инжекционна завеса, която се предвижда да бъде изпълнена, трябва да намали разпространението на замърсените води, както в скалната основа, така и в реката (*Иончо Калчев, 2012*).

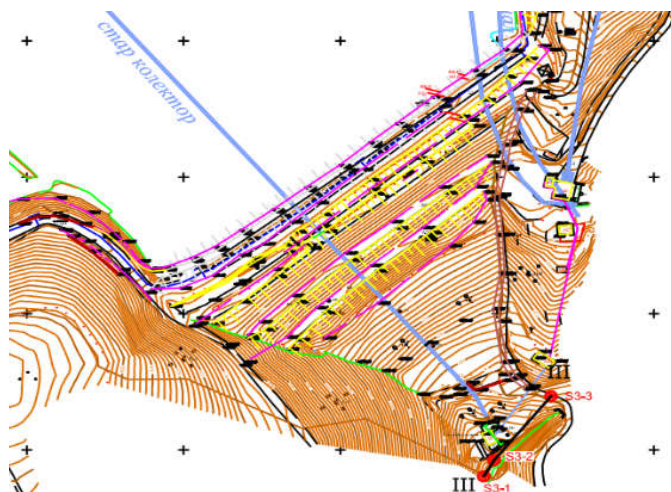
Инжекционната завеса е проектирана да бъде едноредова с разстояние между сондажите 2,0 m, при приет радиус на разпространение на инжекционния разтвор 1,5 m в скалната основа, представена от гнайси изветрели на дълбочина 5-6 m, а след тази дълбочина – от свежи гнайси.

Дълбочината на инжекционната завеса е съобразена с резултатите за водопропускливостта на скалната основа, получени от опитното водонагнетяване в три проучвателни сондажа с дълбочина 15-17 m, които са разположени близо до оста на бъдещата инжекционна завеса, в профил S3 (фиг. 7).

Трите проучвателни сондажа S31, S32 и S33 (разположени в профил S3) са водонагнетени на интервали с дължина от 3 до 5 m. Въз основа на резултатите от проучвателните сондажи може да се заключи, че:

- Скалната основа, в обсега на противифилтрационната завеса, изградена от гнайси (напукани и изветрели в различна степен), се отличава със съществена филтрационна нееднородност.

- На дълбочина 5-6 m водопропускливостта на гнайсите достига от 14 до 70 Люжона (проучвателен сондаж S32 – интервал 5-8 m). В дълбочина водопропускливостта на масива е по-малка, като в интервала 12-17 m достига от 7 до 10 Люжона ($K_f > 1.10^{-4}$ cm/s).



Фигура 7. Ситуация на южната част на хвостохранилището и стената.

Съобразявайки се с филтрационните характеристики на скалната основа, дълбочината на сондажите от противифилтрационната завеса е определена да бъде 20,0 m. С цел да се установи със сигурност, че сондажите на противифилтрационната завеса ще навлязат в слабоводопроницаемите скали (под 3-4 Люжона и $K_f = 5.10^{-5}$ cm/s), се предвижда първата поредност сондажи (5, 9, 13, 17, 21, 25, 29 и 33) да се изпълнят на дълбочина 25 m.

Ако резултатите от водонагнетяването на интервала от 20-25 m в сондажите от първа поредност в един инжекционен участък на завесата показва водопоглъщане над 3 Люжона, то всички сондажи от втора и трета поредност в този участък следва да бъдат удълбочени с 5 m и изпълнени с дълбочина 25 m. Общо се предвижда да бъдат изпълнени 35 сондажа с обща дълбочина 880 m.

Инжекционната завеса се състои от два инжекционни участъка:

- Участък №1 – от сондаж №1 до сондаж №19; $L_1 = 32.60$ m;
- Участък №2 – от сондаж №19 до сондаж №33; $L_2 = 28$ m.

Сондажите от №1 до №4 в инжекционен участък №1 се очаква да навлязат в разломната зона, констатирана от проучвателен сондаж СЗ-1, която е с по-ниски филтрационни характеристики в сравнение с прилежащия масив. Това се дължи на глинестия характер на запълването на пукнатините и предполага, че евентуални водопритоци около нея са свързани с прилежащи зони на по-интензивно напукване на здравата скала. Всички останали сондажи ще навлизат в гнайси с различна интензивност на напукване (*Йончо Калчев, 2012*).

2.2. Стоманобетонова плоча

За да не избива инжекционният разтвор на повърхността при инжектиране на най-горния интервал на сондажите, се предвижда да бъде изпълнена стоманобетонова плоча с дължина 62 m, ширина 3 m и дебелина 0,80 m.

След като се изпълнят изкопите за стоманобетонната плоча по дъното на изкопа, трябва да се положи подложен (изравнителен) бетон с дебелина 0,10 m. След това трябва да се изпълнят стоманобетонни анкери в 2 реда с разстояние между редовете 1,50 m и с разстояние между анкерите в ред – 2,00 m. Дължината на анкерите е 5 m. Сондирането за анкерите трябва да бъде

с диаметър минимум $\varnothing 50$ mm, на дълбочина 5 m. Анкерите се заливат чрез контракторния метод „отдолу – нагоре“ с циментов разтвор 1:0,5 (цимент:вода). Докато циментовият разтвор е още пресен се набива анкерният болт ($\varnothing 32$ mm, Ст. А-III) в сондажа с дължина 5 m. Главите на анкерните болтове се захващат за арматурата на стоманобетоновата плоча. Стоманобетоновата плоча има горна и долна армировка $\varnothing 14$ и 16 mm. Разстоянието между кампадите на стоманобетоновата плоча е 6 - 10 m. Във фугите между кампадите се монтира PVC лента (M-25), за да се ограничи проникването на циментов разтвор във фугата.

Всички сондажи от завесата се изпълняват в средата на стоманобетоновата плоча. Преминаването през плочата ще се извършва с видиеви корони и въртеливо сондиране (Йончо Калчев, 2012).

2.3. Пробиване на сондажите и инжектиране на интервалите от завесата в скалния масив

Сондирането през стоманобетоновата плоча трябва да се извърши с диаметър на короната $\varnothing 75$ mm, ротационно. В инжекционен участък №2 преминаването през насипа под плочата трябва ще се извърши с обсаждане със стоманена тръба $\varnothing 73$ mm външен диаметър до скалната основа. Насипът под пътя няма да се инжектира. Инжектирането ще започне по-долу, от скалния масив. Максималната дълбочина на сондажите се предвижда да достига максимум до 30,00 m. Сондажи от №8 до №30 са вертикални, а останалите - с наклон до 32° от вертикалата.

Преди инжектирането всички сондажи от първа поредност 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29 и 33 ще се водонагнетят, за да се установи водопропускливостта на скалната основа и дълбочината на завесата (Йончо Калчев, 2012).

2.4. Приготвяне на инжекционните смеси

Инжекционният разтвор трябва да представлява различни смеси от цимент, сондажен бентонит и вода в изискваните пропорции. При полагаането му инжекционният разтвор трябва да бъде в колоидна форма, достигната чрез високооборотното механично смесване. Ще се използват циментови разтвори с консистенция от 1:0,7 до 1:1,5 (цимент:вода) за инжектиране на скалата и 1:0,5 (цимент:вода) за дозатпяване на сондажите. Към циментовите разтвори трябва да се прибавя сондажен бентонит – до 0,5% от теглото на цимента. Всеки елемент от оборудването за инжектиране (разтворобъркалка, помпа, маркучи и разтворопроводи), доставя не по-малко от 80 л разтвор за минута до всеки сондаж за инжектиране с максималното налягане, дадено в настоящия работен проект.

Циментовите разтвори ще се приготвяват по следния начин: в бързооборотна разтворомешалка трябва да се налива необходимото количество вода за дадена консистенция на разтвора. Миксерът трябва да се пуска в движение, като на малки порции да се изсипва сондажният бентонит. Разбъркването трябва да продължава до получаване на хомогенна смес (минимум 3-4 мин). След това, на малки порции, трябва да се прибави циментът в количество, съответстващо на дадената консистенция. Разбъркването трябва да продължи 3-4 мин след подаване на последната порция цимент, до получаване на хомогенна смес. Най-накрая трябва да се прибави към разтвора химическата добавка (ускорителя, ако се налага). Готовият циментов разтвор сепрехваля в резервоара (разтворомешалката) за механично разбъркване, като преди това премине през сито с размери на отвора 2 mm. (Йончо Калчев, 2012).

2.5. Инжекционно оборудване

Помпите за циментовите разтвори трябва да могат да доставят около 80 l/min разтвор и налягане най-малко 5,0 МПа. Инжекционните помпи за циментовите разтвори трябва да могат да поддържат сравнително постоянен дебит без големи отклонения и да позволяват точно и плавно регулиране на дебита при налягане от 0 до позволения максимум. За предпазване от

запушване да бъде предвидено бързо промиване на всяка помпа с чиста вода, за премахване на частично утаената смес по време на продължителното нагнетяване.

Резервоарите за механично разбъркване на сместа (30÷50 об/мин) да имат обем, не по-малък от 0,25 m³. Те трябва да бъдат осигурени с измерителни устройства от одобрен тип, калибрирани за съответния обем на резервоара и да служат за измерване на количеството инжекционен разтвор, инжектиран в сондажа.

Смесителите (миксерите) трябва да осигуряват скорост на въртене от 1200 до 1500 об/мин, да имат обем 0,20 m³ и да дават възможност за ефективно смесване на водата, бентонита и цимента. Еднотампонните пакери, които е предвидено да се използват както за водните проби, така и за инжектирането на инжекционните разтвори, трябва да осигуряват ефикасно тампониране в сондажа при максималното изисквано налягане. Ако се преминават слаби породи или тектонски зони трябва да се ползват специален вид пакери - дълги надуваеми секции (1 до 1,5 m).

За точното контролиране на налягането ще се използват мембранни манометри, които да са монтирани както на помпата, така и на устието на сондажа. Манометрите трябва да отчитат с достатъчна точност и да са чувствителни при промяна на налягането. Точността на уредите трябва да бъде подлагана на проверка, като това да се извършва посредством директно съпоставяне с чететите на калибриран и точен инструмент. Инжекционните разтворопроводи трябва да бъдат с диаметър минимум 15 mm (вътрешен), позволяващ висока скорост на изтичане на разтвора. Всички разклонения, връзки, пакери, кранове и т.н. трябва да издържат максималното налягане, предвидено за изпълнение на водонагнетяването и инжектирането.

За намаляване на пулсациите на помпата трябва да се използват специални устройства – демпфери и да се осъществява непрекъсната обратна циркулация на разтвора - от сондажа до резервоара за механично разбъркване на сместа (*Йончо Калчев, 2012*).

2.6. Тестово водонагнетяване

Преди инжектирането всички сондажи от първа и втора поредност и всички контролни сондажи (които ще бъдат зададени след изпълнение на инжекционната завеса) трябва да се водонагнетят, за да се установи водопропускливостта на скалната основа. В сондажите от трета поредност няма да се извършва водна проба.

Водната проба трябва да се извършва на интервали с дължина от 5 m по метода „отдолу-надоре“ за установяване на относителното водопоглъщение. Резултатите от водонагнетяването трябва да бъдат изразени в единици Люжон. Една такава единица е водно количество 1 dm³/min, преминало в 1 линейен метър сондаж при налягане 1 MPa (1 Lu = 1 dm³/60s/m при 1 MPa). Изчисляването на резултатите от водонагнетяването се извършва по формулата:

$$[15] \quad Lu = Q/L.N;$$

където Q – дебит за минута; L – дължина на интервала в метри; N – налягане в MPa;

В някои участъци от завесата сондажите от втора и трета поредност могат да се удълбочат до 25 m, ако водопропускливостта на скалния масив е по-голяма от 3 Люжона.

Продължителността на водонагнетяването е 20 мин, през което време се извършват 2 замервания по 10 мин. За инжекционните интервали, които се намират над водното ниво в скалата, е необходимо предварително водонасищане на масива под налягане. Водонагнетяването трябва да се изпълни със следните налягания:

- за интервали до 5 m - 0,4 MPa (4 atm);
- за интервали от 5 до 10 m - 0,7 MPa (7 atm);
- за интервали над 10 m - 1,0 MPa (10 atm);

Тези налягания трябва да бъдат отнесени до средата на интервала, като се отчете теглото на водата от устието на сондажа до средата на интервала, както и нивото на подземните води в скалата. Ако водното количество е много голямо (достигнат максимален дебит на помпата) и не може да бъде достигнато пределното налягане, то това количество трябва да се поддържа постоянно, като налягането се наблюдава през всяка минута в продължение на 10 минути (Иончо Калчев, 2012).

2.7. Инжектиране на сондажите от завесата

Организацията за инжектирането трябва да бъде такава, че да дава възможност за непрекъснато подаване на инжекционен разтвор в сондажа, който ще се инжектира и да включва резервното оборудване, което да е в състояние да бъде въведено в работа при необходимост. Помпеното оборудване трябва да има капацитет да подава непрекъснато форсирано количество инжекционен разтвор с налягане – от необходимото в даден момент до максимално определеното, с плавна промяна в дебита от нула до максималния ѝ капацитет. Само минимални колебания в налягането по време на помпения цикъл трябва да се допускат. За по-добър контрол на налягането и количеството на инжекционен разтвор в сондажите да се установи непрекъсната циркулация на разтвора в системата за инжектиране.

Изводи при анализ на проекта и реализацията на противо-филтрационната завеса:

1. Изграждането на противифилтрационната инжекционна завеса се очаква да намали разпространението на замърсители в скалната основа и в реката (р. Воздол).
2. Според характеристиките на скалната основа, е определена дълбочина на сондажите от противифилтрационната завеса от 20 m, като първата поредност сондажи са реализирани на дълбочина 25 m за навлизането им в слабо-водопроницаемите скали.
3. Инжекционната завеса се състои от два инжекционни участъка, като са изпълнени 35 сондажа с обща дълбочина 880 m.
4. Използвани са циментови разтвори с консистенция от 1:0,7 до 1:1,5 (цимент:вода) за инжектиране на скалата и 1:0,5 (цимент:вода) за дозапълване на сондажите. Към циментовите разтвори е прибавен сондажен бентонит – до 0,5% от теглото на цимента.
5. Ефектът от извършените сондажно-инжекционни работи се установява с изпълнение на контролни сондажи след завършване на противифилтрационната завеса, като водопоглещането в тях трябва да отговаря на предварително определен критерий.

3. Изследвания за установяване на хидродинамиката на потока при различни варианти на материала в зоната на противифилтрационната бариера

Основната задача на тези изследвания е да се установят хидравличните загуби на водния поток при преминаване през проба взета от района на изследването. Направените измервания позволяват да се построи зависимостта между хидравличните загуби - Δp [Pa] и дебита - Q [m³/s] при различна височина на запълване - H [m]. Данните от измерванията представени в табл. 2 - 11, съгласно зависимостите:

$$[1] \text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu};$$

където: **d** - вътрешен диаметър на колоната $d = 0,12 \text{ m}$, **ρ** - плътност на водата (1000 kg/m³), **f** (m²) - напречна площ на колоната, **μ** - динамичен вискозитет на водата (0,001 Pa.s). Като се вземе в предвид зависимостта:

$$[2] \Delta p = \xi \cdot \frac{\rho w^2}{2} \rightarrow \xi = \frac{2\Delta p}{\rho w^2};$$

където: w (m/s) е скоростта на движение на водния поток; ξ - коефициент на местно съпротивление.

От (1) и (2) може да се изведе следното уравнение:

$$[3] \xi = \frac{2\Delta p}{\mu \cdot Re};$$

Като се вземе в предвид и зависимостта:

$$[4] w = \frac{Q}{f};$$

където: Q (m³/s) - дебит на водата, f (m²) - напречна площ на колоната

Могат да се построят зависимостите между коефициента на местно съпротивление ξ и числото на Рейнолдс за различните височини на запълване на филтъра.

Съгласно направените измервания на Δp при различна височина H (m) на запълване и различен дебит Q (m³/s) на водата, могат да се намерят зависимостите $\Delta p = f(Q)$, $\Delta p = f(Re)$ и $\xi = f(Re)$, при различни стойности на височината на филтруващия слой във колоната - H [m].

Интерес представляват екстраполирания графичен и аналитичен вид на зависимостта $\xi = f(Re)$ при различните условия и варианти на запълване в колоните (Фиг. 8 - 13). Тези зависимости позволяват да се установи стойността на коефициента на местни съпротивления ξ при различни хидродинамични условия. Направените измервания позволяват да се построи зависимостта между хидравличните загуби - Δp [Pa] и дебита - Q [m³/s]; [ml/s], както и да се екстраполира зависимостта между коефициента на местни съпротивления и числото на Рейнолдс - Re . Изследвани са контролна проба (средна проба с материал от зоната на противифилтрационната завеса) и три варианта на активен слой поставен в един и същи обем от материала, тестван в контролната проба - бентонит, зеолит и варовик с три различни дебелини на слоя. Резултатите са представени в табл. 2 - 11.

Таблица 2. Хидродинамика на потока при различна скорост в контролната проба

| Дебит Q , m ³ /s | Δp , Pa | Re | Скорост, w , m/s | Съпротивление, ξ |
|-------------------------------|-----------------|--------|--------------------|----------------------|
| 0,00000261 | 4071 | 331,49 | 0,03324840 | 7974,535 |
| 0,00000358 | 4267 | 454,68 | 0,04560509 | 4115,548 |
| 0,00000454 | 4464 | 576,61 | 0,05783439 | 2677,222 |
| 0,00000616 | 4709 | 782,36 | 0,07847133 | 1534,051 |
| 0,00000778 | 4954 | 988,11 | 0,09910828 | 1011,743 |

Таблица 3. Хидродинамика на потока при пълнеж от варовик при различна скорост за слой от 10 mm

| Дебит Q, m ³ /s | Δp, Pa | Re | Скорост, w, m/s | Съпротивление, ξ |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| 0,00000261 | 3741 | 331,49 | 0,03324840 | 7328,110 |
| 0,00000358 | 3943 | 454,68 | 0,04560509 | 3803,048 |
| 0,00000454 | 4111 | 576,61 | 0,05783439 | 2465,515 |
| 0,00000616 | 4328 | 782,36 | 0,07847133 | 1409,933 |
| 0,00000778 | 4551 | 988,11 | 0,09910828 | 929,439 |

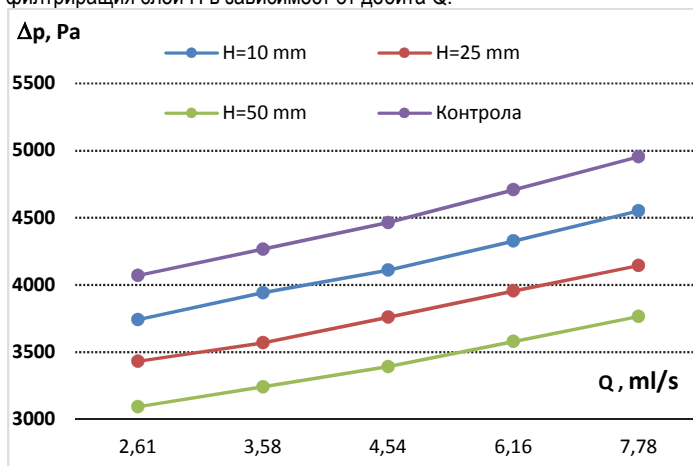
Таблица 4. Хидродинамика на потока при пълнеж от варовик при различна скорост за слой от 25 mm

| Дебит Q, m ³ /s | Δp, Pa | Re | Скорост, w, m/s | Съпротивление, ξ |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| 0,00000261 | 3432 | 331,49 | 0,03324840 | 6228,110 |
| 0,00000358 | 3570 | 454,68 | 0,04560509 | 3443,287 |
| 0,00000454 | 3760 | 576,61 | 0,05783439 | 2255,008 |
| 0,00000616 | 3956 | 782,36 | 0,07847133 | 1288,746 |
| 0,00000778 | 4144 | 988,11 | 0,09910828 | 846,319 |

Таблица 5. Хидродинамика на потока при пълнеж от варовик при различна скорост за слой от 50 mm

| Дебит Q, m ³ /s | Δp, Pa | Re | Скорост, w, m/s | Съпротивление, ξ |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| 0,00000261 | 3094 | 331,49 | 0,03324840 | 5614,736 |
| 0,00000358 | 3242 | 454,68 | 0,04560509 | 3126,929 |
| 0,00000454 | 3392 | 576,61 | 0,05783439 | 2034,305 |
| 0,00000616 | 3579 | 782,36 | 0,07847133 | 1165,931 |
| 0,00000778 | 3765 | 988,11 | 0,09910828 | 768,917 |

Фигура 8. Пад на налягането в колоната, получени при пълнеж от варовик при различна височина на филтриращия слой H в зависимост от дебита Q.



Фигура 9. Екстраполирани зависимости между коефициента на местни съпротивления и числото на Re при различна дебелина на слой от варовик (10, 25 и 50 mm)

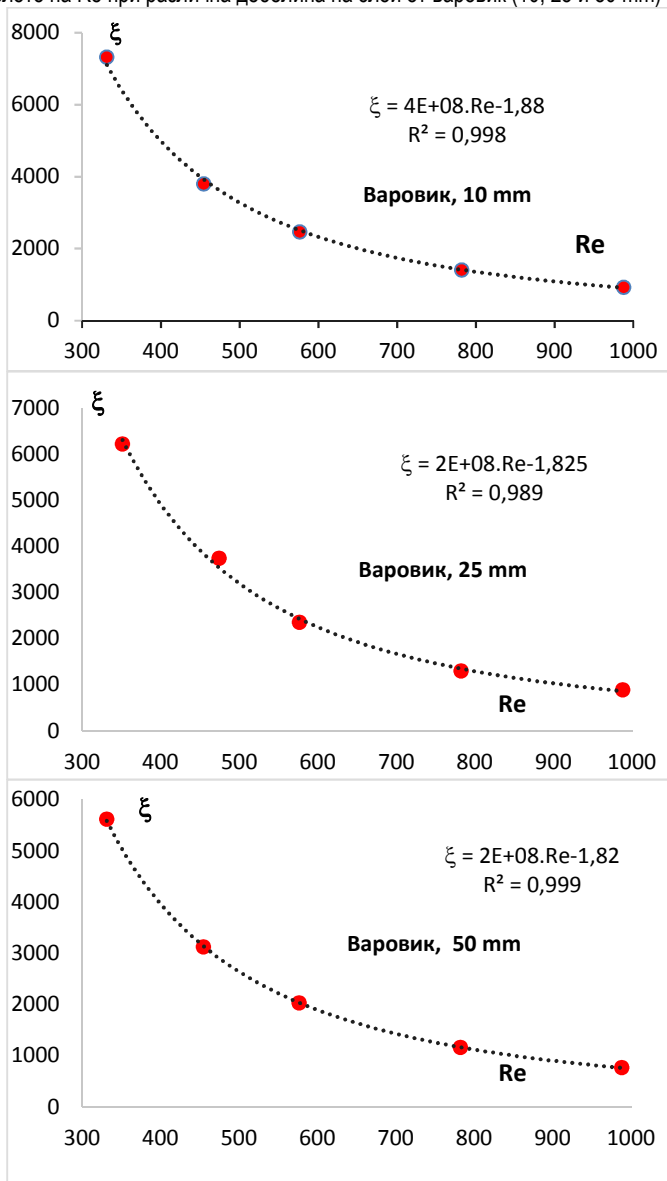


Таблица 6. Хидродинамика на потока при пълнеж от зеолит с различна скорост за слой от 10 mm

| Дебит Q, m ³ /s | Δp, Pa | Re | Скорост, w, m/s | Съпротивление, ξ |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| 0,00000261 | 3800 | 331,49 | 0,03324840 | 6895,925 |
| 0,00000358 | 3993 | 454,68 | 0,04560509 | 3851,273 |
| 0,00000454 | 4172 | 576,61 | 0,05783439 | 2502,099 |
| 0,00000616 | 4399 | 782,36 | 0,07847133 | 1433,062 |
| 0,00000778 | 4620 | 988,11 | 0,09910828 | 943,531 |

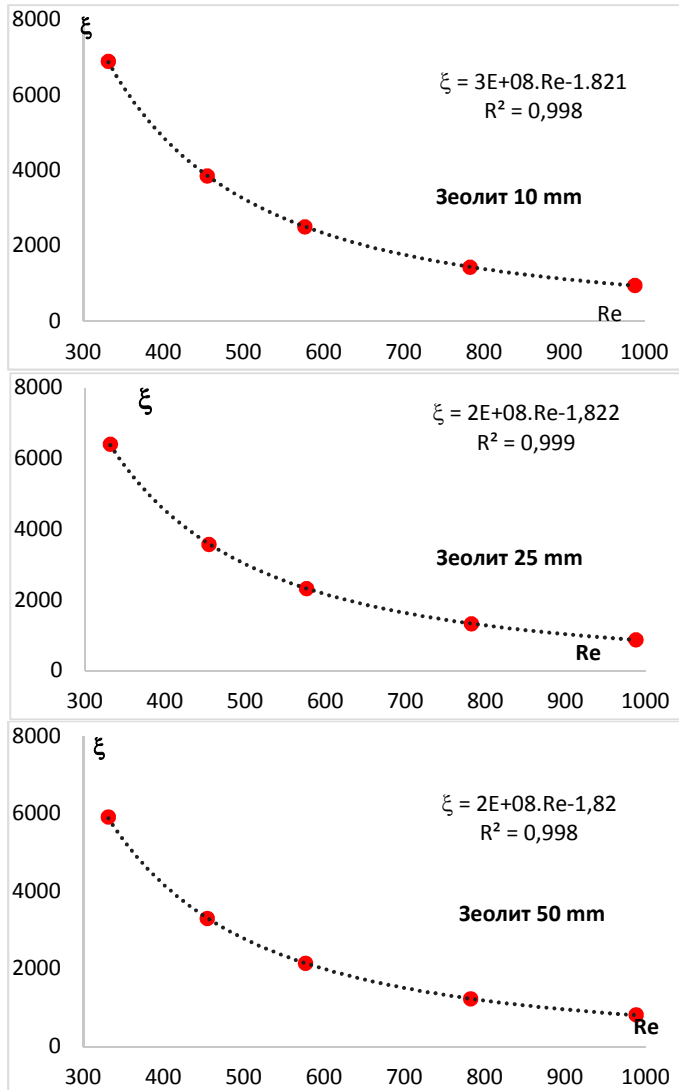
Таблица 7. Хидродинамика на потока при пълнеж от зеолит с различна скорост за слой от 25 mm

| Дебит Q, m ³ /s | Δp, Pa | Re | Скорост, w, m/s | Съпротивление, ξ |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| 0,00000261 | 3532 | 331,49 | 0,03324840 | 6409,582 |
| 0,00000358 | 3708 | 454,68 | 0,04560509 | 3576,389 |
| 0,00000454 | 3871 | 576,61 | 0,05783439 | 2321,579 |
| 0,00000616 | 4081 | 782,36 | 0,07847133 | 1329,468 |
| 0,00000778 | 4296 | 988,11 | 0,09910828 | 877,361 |

Таблица 8. Хидродинамика на потока при пълнеж от зеолит с различна скорост за слой от 50 mm

| Дебит Q, m ³ /s | Δp, Pa | Re | Скорост, w, m/s | Съпротивление, ξ |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| 0,00000261 | 3257 | 331,49 | 0,03324840 | 5910,534 |
| 0,00000358 | 3413 | 454,68 | 0,04560509 | 3291,860 |
| 0,00000454 | 3571 | 576,61 | 0,05783439 | 2141,658 |
| 0,00000616 | 3767 | 782,36 | 0,07847133 | 1227,176 |
| 0,00000778 | 3963 | 988,11 | 0,09910828 | 809,354 |

Фигура 10. Екстраполирани зависимости между коефициента на местни съпротивления и числото на Re при различна дебелина на слоя зеолит (10, 25 и 50 mm)



Фигура 11. Пад на налягането в колоната получени при пълнеж от зеолит при различна височина на филтриращия слой H в зависимост от дебита Q

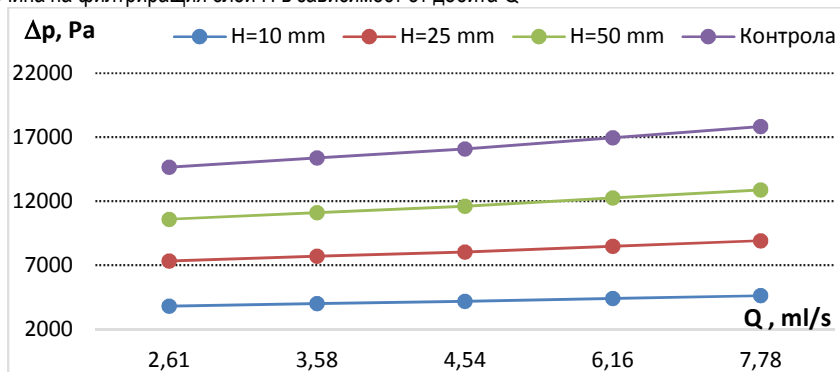


Таблица 9. Хидродинамика на потока при пълнеж от бентонит с различна скорост - слой 5 mm

| Дебит Q, m ³ /s | Δp, Pa | Re | Скорост, w, m/s | Съпротивление, ξ |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| 0,00000261 | 5180 | 331,49 | 0,03324840 | 9400,236 |
| 0,00000358 | 5423 | 454,68 | 0,04560509 | 5230,517 |
| 0,00000454 | 5682 | 576,61 | 0,05783439 | 3407,701 |
| 0,00000616 | 5989 | 782,36 | 0,07847133 | 1951,037 |
| 0,00000778 | 6346 | 988,11 | 0,09910828 | 1296,028 |

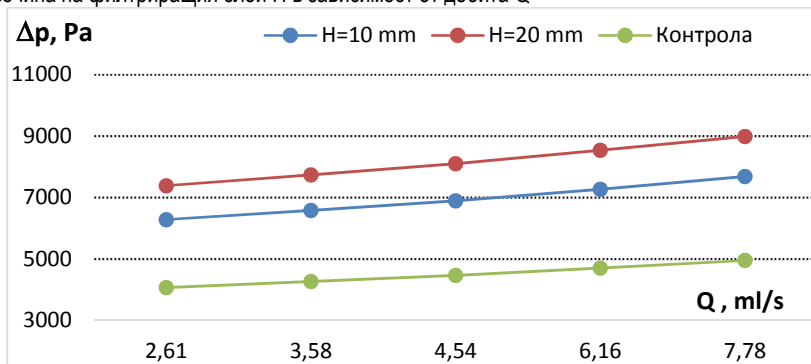
Таблица 10. Хидродинамика на потока при пълнеж от бентонит с различна скорост - слой 10 mm

| Дебит Q, m ³ /s | Δp, Pa | Re | Скорост, w, m/s | Съпротивление, ξ |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| 0,00000261 | 6285 | 331,49 | 0,03324840 | 11405,499 |
| 0,00000358 | 6580 | 454,68 | 0,04560509 | 6346,451 |
| 0,00000454 | 6891 | 576,61 | 0,05783439 | 4132,782 |
| 0,00000616 | 7275 | 782,36 | 0,07847133 | 2369,977 |
| 0,00000778 | 7688 | 988,11 | 0,09910828 | 1570,101 |

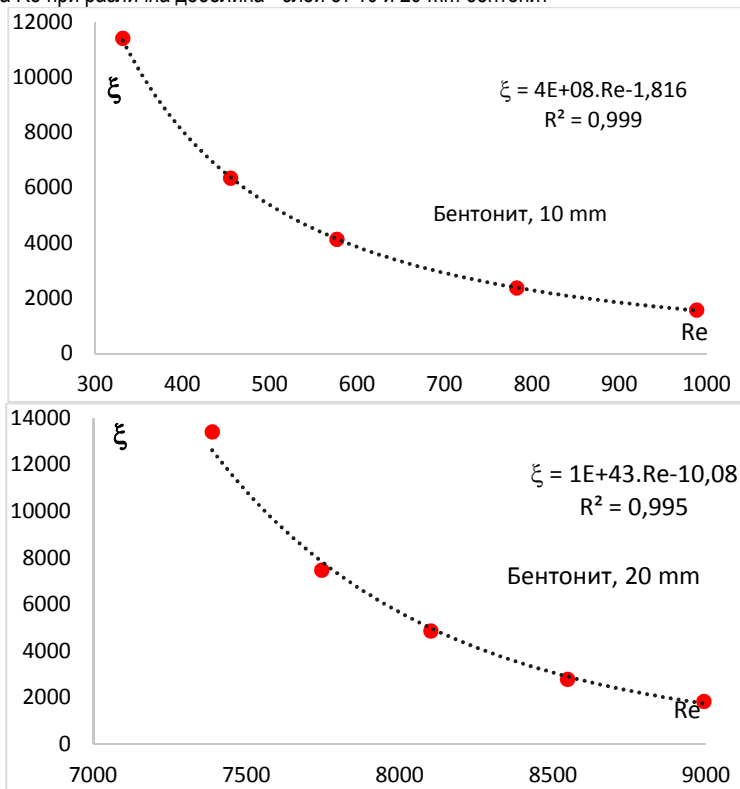
Таблица 11. Хидродинамика на потока при пълнеж от бентонит с различна скорост - слой 20 mm

| Дебит Q, m ³ /s | Δp, Pa | Re | Скорост, w, m/s | Съпротивление, ξ |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| 0,00000261 | 7388 | 331,49 | 0,03324840 | 13407,132 |
| 0,00000358 | 7745 | 454,68 | 0,04560509 | 7470,100 |
| 0,00000454 | 8102 | 576,61 | 0,05783439 | 4859,062 |
| 0,00000616 | 8547 | 782,36 | 0,07847133 | 2784,356 |
| 0,00000778 | 8992 | 988,11 | 0,09910828 | 1836,414 |

Фигура 12. Пад на налягането в колоната получени при слой от бентонит при различна височина на филтриращия слой H в зависимост от дебита Q



Фигура 13. Екстраполирани зависимости между коефициента на местни съпротивления и числото на Re при различна дебелина - слой от 10 и 20 mm бентонит



Фигура 14. Снимки на опитната инсталация с U-образен диференциален манометър и на филтрационните колони



Изводи от екперимента за установяване хидродинамиката на потока при различни материали в зоната на противифилтрационната бариера :

1. При използвани три различни варианта на материали вложени в зоната на филтрационната завеса, които биха увеличили положителният им ефект по отношение на задържане на замърсяването в минимален размер, са установени графичните зависимости по отношение хидравличните загуби в зависимост от вида и дебелината на слоя материал.
2. От получените стойности на графични зависимости $\Delta p = (Q)$, са екстраполирани зависимостите между коефициента на местни съпротивления - ξ и числото на Re, за три изледвани варианта на използвани материали.
3. С увеличението на дебита очаквано нарастват и Δp стойностите (свързани със хидравлични загуби).
4. Отчетено е и повишаването на хидр. съпротивление в следствие на работата на филтриращите елементи на инсталацията.
5. Поради специфичните особености на бентонита при хидратиране, се наблюдава значителна разлика в стойностите на съпротивление, в сравнение с другите материали.

4. Математически моделни изследвания за прогнозиране на замърсяването на подземните води от хвостохранилище “Челопеч” и оценка на защитната роля на противифилтрационната завеса

Посредством математически тримерни (3D) модели е направена компютърна симулация с дългосрочна прогноза за замърсяването на подземните води от хвостохранилище “Челопеч”. Другата много важна цел на тези модели е да се оцени количествено ефективността на изградената през 2014 г. под стената на хвостохранилището противифилтрационна бариера.

В проведените моделни изследвания са използвани два предварително избрани ключови замърсители – сулфатен йон (SO_4) и арсен (As). Мотивите за този избор са следните: (1) Сулфатните йони са много консервативни, трудно се задържат от филтрационната среда и мигрират със скоростта на подземния поток. (2) Арсенът в двете си форми е токсичен, силно реактивен, лесно се сорбира от филтрационната среда и е много слабо подвижен. (3) Двата ингредиента се съдържат във високи концентрации в хвостохранилището.

Разработени са три основни числени модела:

- Модел на филтрационното поле - модел FMB;
- Модел на миграцията на ключовия замърсител SO_4 –модел MTMB- SO_4 ;
- Модел на миграцията на ключовия замърсител As –модел MTMB-As.

С модел FMB е определена структурата на филтрационното поле в рамките на изследваната част от подповърхностното пространство при отчитане на всички външни въздействия. Получените решения за разпределението на хидравличните напори са използвани като база при съставянето на модел MTMB- SO_4 и модел MTMB-As.

Модел MTMB- SO_4 представлява компютърна симулация на условията за разпространение на много подвижни замърсители по примера на SO_4 , а модел MTMB-As симулира условията за миграция на слабо подвижни замърсители по примера на As. Посредством тези модели е направена количествена оценка на замърсяването на подземните води преди изграждане на противифилтрационната бариера. С модел MTMB- SO_4 е определен максималният обхват на замърсяването, а с модел MTMB-As е направена оценка за разпространението на токсичните замърсители (тежките метали) и са определени границите на най-интензивно замърсяване около хвостохранилището.

Ефективността на противифилтрационната бариера е оценена количествено с четири прогнозни миграционни модела (MTM1- SO_4 , MTM2- SO_4 , MTM3-As и MTM4-As) които са изцяло базирани на основните модели MTMB- SO_4 и MTMB-As. С всеки от тях е направена дългосрочна прогноза за замърсяването на подземните води от хвостохранилището при изчислителни времена 25, 50 и 100 години. Два от прогнозните модели (MTM1- SO_4 и MTM3-As) не включват действието на противифилтрационната стена, а другите два модела (MTM2- SO_4 и MTM4-As) дават прогноза за възможните миграционни процеси при отчитане на нейната защитна роля.

Разработените основни и прогнозни модели са изцяло базирани на предварително съставен общ концептуален модел на хидрогеоложките и техногенните условия в една по-широка част от сложния водоносен комплекс в района на хвостохранилището. При тяхното съставяне са използвани и компютърните програми Modflow и MT3D-MS.

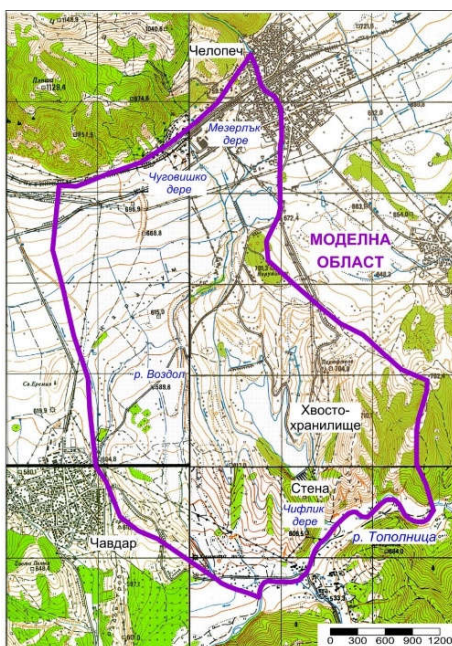
4.1. Концептуален модел

Математическите модели са разработени при следната обща концепция за хидрогеоложките и техногенните условия в района на изследвания обект.

4.1.1. Моделна област

Обхватът на моделната област е определен след дефиниране на ясни хидрогеоложки граници, обезпечаващи автономна структура на филтрационното поле и свободно развитие на миграционните процеси. По предварителни оценки са детерминирани и оптималните граници на миграционното поле, което по дефиниция включва района между източника на замърсяване и първия водоприемник (реципиент). В случая поради сложната пространствена структура на филтрационното поле и неясните хидравлични връзки не позволяват точно определяне на най-близкия реципиент. Като такъв може да се приеме Чифлик дере или с по-голям резерв - р. Тополница, която изцяло контролира регионалната структура на подземния поток. С оглед на това за моделната област са приети следните пространствени граници:

- В план обхваща територията с площ около 13.6 km² между южното подножие на Средна гора и р. Тополница, в която попадат водосборите на р. Воздол и Чифлик дере (Фиг. 15).
- В разрез включва всички установени хидрогеоложки единици от различен ранг до дълбочина 350 m.



Фигура 15. Местоположение на изследвания обект. Граници на моделната област. (По Топографската карта на България М 1:25000)

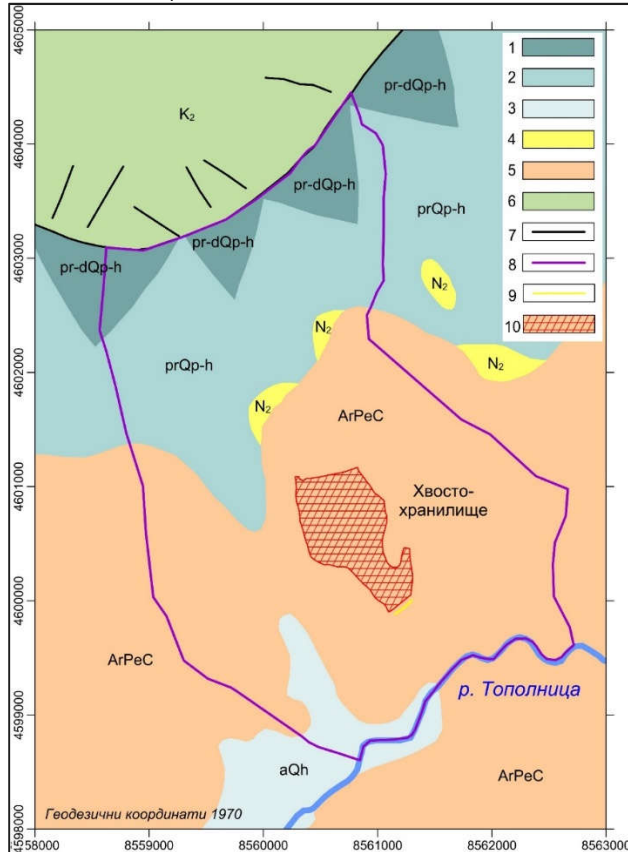
4.1.2. Хидрогеоложки единици

В границите на моделната област са установени две главни хидрогеоложки единици – кватернер-неогенски водоносен комплекс и докамбрийски слабо водоносен комплекс.

Кватернер-неогенският водоносен комплекс има доминиращо присъствие в северните и централните части на моделната област, а на югозапад е развит единствено по терасите на

реките Воздол и Тополница. Разполага се в най-горните части на хидрогеоложкия разрез върху скалите съставлящи докамбрийския комплекс. Изграден е от несвързани и полусвързани седименти (чакъли, пясъци и глини) с преобладаващо кватернерна възраст, различни генезис и твърде разнообразни литоложки и зърнометричен състав. Въз основа на тези различия в рамките на кватернер-неогенския водоносен комплекс са диференцирани четири хидрогеоложки единици от по-нисък ранг:

- Пролувиално-делувиален слабо водоносен хоризонт;
- Пролувиален водоносен хоризонт;
- Алувиален водоносен хоризонт;
- Неогенски водоносен хоризонт.



Фигура 16. Хидрогеоложка карта. Граници на моделната област. (По Геоложката карта на България М 1:100000, картни листове Панагюрище и Тетевен), 1 – Пролувиално-делувиален слабо водоносен хоризонт; 2 – Пролувиален водоносен хоризонт; 3 – Алувиален водоносен хоризонт; 4 – Неогенски водоносен хоризонт; 5 – Докамбрийският слабо водоносен комплекс (Горна слабо водоносна зона); 6 – Горнокреден слабоводоносен комплекс; 7 – Разломи; 8 – Граници на моделната област; 9 – Противопилтрационна завеса (барьера); 10 – Хвостохранилище

Повърхностните граници на тези ниско рангови единици са илюстрирани на Фиг. 16, а кратка информация за техния геоложки и възрастов обхват, литоложки състав и средна дебелина са дадени в Таблица 12.

Докамбрийският слабо водоносен комплекс е основната хидрогеоложка единица, в чиито граници попадат източникът на замърсяване (хвостохранилището) и противофилтрационна бариера. В този аспект е не само главен обект на техногенно въздействие, но и среда за развитие на миграционните процеси. Формиран е в скалите от Неразчленената Арденска група, представени от мигматизирани ивичести и очни гнайси с неиздържани прослойки от амфиболити, гнайси и гнайсошисти. Има много широки повърхностни разкрития в южната половина на моделната област, а в северна посока е припокрит от кватернер-неогенския комплекс (Фиг. 16). В горната си част, главно в разкритите зони, скалите са много силно напукани и изветрели. В дълбочина, на около 15-20 m и под кватернерната покривка, вторичните промени постепенно затихват. На базата на установените различия в степента на изветряне в докамбрийския слабо водоносен комплекс са отделени три хидрогеоложки единици от по-нисък ранг (Табл. 12):

- Горна слабо водоносна зона;
- Средна слабо водоносна зона;
- Долна много слабо водоносна зона.

Таблица 12. Хидрогеоложки единици. Моделни пластове и зони

| Хидрогеоложка единица | | Моделна единица | | Колектор | | Средна дебелина m _{ср.} , m | |
|--|---|-----------------|---------------|---|---|---|---------|
| Водоносен комплекс | Водоносен хоризонт / зона | Моделен пласт | Модел на зона | Геоложка единица | Литология | | |
| Кватернер-неогенски водоносен комплекс | Пролувиално-делувиален слабо водоносен хоризонт | ML-1 | MZ-1.1 | Пролувиално-делувиални образувания (pr-dQp-h) | Прахови глини, глини с чакъл и прослойки от пясък | 30-40 | |
| | Пролувиален водоносен хоризонт | | MZ-1.2 | Пролувиални образувания (prQp-h) | Песъчливи глини с прослойки от чакъл и пясък | 25-65 | |
| | Алувиален водоносен хоризонт | | MZ-1.3 | Алувиални образувания (aQh) | Пясъци и чакъли, силно заглинени | 30-35 | |
| | Неогенски водоносен хоризонт | | MZ-1.4 | Глинесто-песъчлива задруга (N ₂) | Глини, песъчливи глини и глинести пясъци | 20 | |
| Докамбрийски слабо водоносен комплекс | Горна слабо водоносна зона | ML-2 | MZ-1.5 | Неразчленена Арденска група (ArPeC) | Мигматизирани гнайси с прослойки от амфиболити, гнайси и гнайсо-шисти | Силно изветрели | 5-10 |
| | Средна слабо водоносна зона | | MZ-2.1 | | | Напукани и изветрели | 15-20 |
| | Долна много слабо водоносна зона | ML-3 | MZ-3.1 | | | Слабо напукани | 100-250 |

4.1.3. Хидрогеоложки параметри

Физични характеристики. Данни за основните физични характеристики на скалите, влияещи върху скоростта на миграционните процеси - обща порестост n , активна порестост n_0 , обща плътност ρ_b и специфична плътност ρ_s , са представени в Таблица 13. Представените осреднени стойности на n , ρ_b и ρ_s са приети на базата на наличната информация за резултатите от лабораторните изследвания на земни проби, взети при изграждане на мониторинговите сондажи в района на изследвания обект. Посочените стойности за активна порестост n_0 са приети съобразно типа на скалите, съставляващи съответната хидрогеоложка единица (*Spitz and Moreno, 1996; Anderson et al., 2015; Стоянов, 2004, 2019 и др.*).

Таблица 13. Физични и филтрационни характеристики на хидрогеоложките единици и моделните зони

| Водоносен хоризонт / зона | Моделна зона | Физични характеристики | | | | Филтрационни характеристики | |
|---|--------------|------------------------|-----------------------------|--|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| | | Обща порестост n , - | Активна порестост n_0 , - | Обща плътност ρ_b , g/cm ³ | Специфична плътност ρ_s , g/cm ³ | Коефициент на филтрация k , m/d | Скорост на филтрация W , m/d |
| Пролувиално-делувиален слабо водоносен хоризонт | MZ-1.1 | 0.35 | 0.10 | 1.77 | 2.72 | 5.0×10^{-3} | 3.0×10^{-5} |
| Пролувиален водоносен хоризонт | MZ-1.2 | 0.32 | 0.15 | 1.87 | 2.75 | 6.0×10^{-2} | 8.0×10^{-5} |
| Алувиален водоносен хоризонт | MZ-1.3 | 0.31 | 0.20 | 1.88 | 2.73 | 2.1×10^{-1} | 2.2×10^{-4} |
| Неогенски водоносен хоризонт | MZ-1.4 | 0.28 | 0.05 | 1.97 | 2.74 | 1.0×10^{-1} | 1.0×10^{-4} |
| Горна слабо водоносна зона | MZ-1.5 | 0.25 | 0.02 | 2.09 | 2.78 | 1.8×10^{-2} | 5.0×10^{-5} |
| Средна слабо водоносна зона | MZ-2.1 | 0.22 | 0.018 | 2.15 | 2.78 | 1.6×10^{-2} | - |
| Долна много слабо водоносна зона | MZ-3.1 | 0.15 | 0.01 | 2.36 | 2.78 | 7.0×10^{-4} | - |

Филтрационни характеристики. Силната хетерогенност на отделените хидрогеоложките единици от различен ранг е предпоставка за големи различия в тяхната водопропускливост. Средните стойности за 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 филтрационни тестове - водочерпения и водонагнетявания (*Йончо Калчев, 2012*). Използвани са и таблични данни за някои от скалните разновидности (*Spitz*

and Moreno, 1996). Представените в Табл. 13 изчислителни стойности на k са прецизирани при калибрацията на основния филтрационен модел FMB.

Таблица 14. Миграционни характеристики на хидрогеоложките единици и моделните зони

| Водоносен хоризонт / зона | Моделна зона | Ключов замърсител | Коефициент на разпределение | Фактор на забавяне R_f | Активна порестост n_0 | Сорбционна порестост n_s | Надлъжна дисперсивност α_L , m | Коефициент на дифузия D_M , m ² /d |
|---|--------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---|
| Пролувиално-делувиален слабо водоносен хоризонт | MZ-1.1 | SO ₄ | 0.0 | 1.0 | 0.10 | 0.10 | 2.0 | 3.0x10 ⁻⁴ |
| | | As | 1.3 | 7.6 | | 0.76 | | |
| Пролувиален водоносен хоризонт | MZ-1.2 | SO ₄ | 0.0 | 1.0 | 0.15 | 0.15 | 6.0 | 2.5x10 ⁻⁴ |
| | | As | 1.4 | 9.2 | | 1.38 | | |
| Алувиален водоносен хоризонт | MZ-1.3 | SO ₄ | 0.0 | 1.0 | 0.20 | 0.20 | 15.0 | 1.5x10 ⁻⁴ |
| | | As | 2.5 | 15.2 | | 3.04 | | |
| Неогенски водоносен хоризонт | MZ-1.4 | SO ₄ | 0.0 | 1.0 | 0.05 | 0.05 | 10.0 | 2.0x10 ⁻⁴ |
| | | As | 2.1 | 15.8 | | 0.79 | | |
| Горна слабо водоносна зона | MZ-1.5 | SO ₄ | 0.0 | 1.0 | 0.02 | 0.020 | 20.0 | 4.5x10 ⁻⁴ |
| | | As | 3.0 | 25.1 | | 0.50 | | |
| Средна слабо водоносна зона | MZ-2.1 | SO ₄ | 0.0 | 1.0 | 0.018 | 0.018 | 12.0 | 5.0x10 ⁻⁴ |
| | | As | 3.2 | 31.3 | | 0.56 | | |
| Долна много слабо водоносна зона | MZ-3.1 | SO ₄ | 0.0 | 1.0 | 0.01 | 0.010 | 5.0 | 6.5x10 ⁻⁴ |
| | | As | 3.3 | 52.9 | | 0.53 | | |

Миграционни характеристики. Хидрогеоложките единици в миграционните модели са характеризирани обобщено с осреднени изчислителни стойности за обемната плътност ρ_b , активната порестост n_0 , надлъжната дисперсивност α_L , коефициента на молекулярна дифузия D_M и коефициента на разпределение K_D спрямо ключовите замърсители SO₄ и As, респ. фактора на забавяне R_f и сорбционната порестост n_s . Стойностите на n_0 , n_s , α_L , D_M , K_D и R_f са изчислени чрез корелационни преходи с цитираните в специализираната литература данни за изграждащите ги литоложки разновидности (Javandel et al, 1984; Adams and Gelhar, 1992; Spitz and Moreno, 1996; Anderson et al., 2015; Стоянов, 2004, 2019 и др.).

Посочените в Таблица 14 изчислителни стойности са уточнени при калибриране на миграционните модели MTMB-SO₄ и MTMB-As.

С цел доуточняване и прецизиране на приетите изчислителни стойности хидрогеоложки параметри е използвана компютърна програма Enviro Base, разработка на Waterloo Hydrogeologic Inc., Ontario Canada (2003). Програмата съдържа база данни с таблични стойности на параметрите k , α_L и K_D .

4.1.4. Структура на подземния поток

Подземните води са безнапорни до слабо напорни и в пряка хидравлична връзка с реките и повърхностните водоеми. Структурата на подземния поток регионално се контролира от р. Тополница, а локално - от нейните по-големи притоци.

Генералната посока на подземните води е от север на юг – към р. Тополница. Средният хидравличен градиент е сравнително висок – около 0.03-0.04. В участъка под хвостохранилището и на изток от него градиентът е доста по-висок – около и над 0.10-0.15. Нивата на подземните вариат от около 0.5-3.0 m в понижените участъци до 30 m и повече в най-високите части на терена.

4.1.5. Граници и гранични условия

Северната граница на моделната област е приета по регионалното разломно нарушение, отделящо докамбийския метаморфен комплекс от скалите изграждащи южните склонове на Средна гора. Във филтрационния модел се задава като гранично условие от I род по схемата GHB (General Head Boundary). Южната граница е маркирана по руслото на р. Тополница. В модела е зададена като гранично условие от III род по схемата (River). Западната граница е зададена по повърхностен вододел. Включена е като гранично условие от II род в частния случай „граница с нулев разход“. Източната граница е разнородна. В североизточната част по р. Воздол е зададена с гранично условие от III род (River). В южна посока източната граница е симулирана с гранично условие от III род по схемата GHB.

Подхранването на подземните води в моделната област постъпва от различни източници (Sources): естествен подземен поток по част северната и източната граница на модела; повърхностни водоизточници – р. Воздол, Чуговишко дере, Мезерлък дере и Чифлик дере; инфилтрация на валежите; инфилтрация от дъното на хвостохранилището.

Дренажирането на подземния поток се осъществява главно в няколко основни приемника (Sinks):

- подземно в някои части на северната и южната граница на моделната област;
- повърхностни водоизточници – основно в р. Тополница;

4.1.6. Източник на замърсяване. Ключови замърсители.

Основен източник на замърсяване на подземните води е хвостохранилището. То е разположено в понижена релефна форма, включваща няколко малки дерета, заустващи се в Чифлик дере, десен приток на р. Тополница (Фиг. 15). Неговата експлоатация е започнала преди повече от 15 години. Отсъствието на изолиращ екран под дъното на хвостохранилището са създали благоприятни условия течните емисии да се инфилтрират непрекъснато и безпрепятствено в дълбочина. Поради това в миграционните модели се разглежда консервативен сценарий, който включва наличие на непрекъснат източник на замърсяване по цялата площ на хвостохранилището.

Течните емисии, постъпващи в подземните води от хвостохранилището, представляват “коктейл” от замърсители, всеки от които с различна концентрация и различна миграционна способност. Средните стойности на концентрацията на типичните за източника замърсители в проби от инфилтратата са представени в Табл. 15. Те са изчислени въз основа на резултатите от експлоатацията на локалната система за мониторинг на подземните и повърхностни води на Хвостохранилище Челопеч за периода 2009 - 2011 г. (*Управление и контрол на водно и хвостово стопанство към „Челопеч Майнинг“ ЕАД, Л. Кантарджиев, 2012*).

Таблица 15. Средни стойности на концентрацията на типичните за хвостохранилището замърсители

| Замърсител | SO ₄ | Cl | Cu | Ni | Fe | Cd | As |
|--------------------|-----------------|------|-----|------|------|-------|-----|
| Концентрация, mg/l | 2111.0 | 53.3 | 5.6 | 0.09 | 32.0 | 0.049 | 0.3 |

При моделиране на процесите на замърсяването на подземните води от източници, съдържащи голям брой замърсители, е достатъчно да се изследва поведението на два ключови замърсителя, които представят различното поведение на несорбируемите конвенционални замърсители и силносорбируемите токсични замърсители (Стойанов, 2019). Анализът на конкретните условия показва, че като ключови замърсители е целесъобразно да се ползват SO₄ и As. Сулфатните йони са практически несорбируеми, трудно се задържат от филтрационната среда и се движат със скоростта на подземния поток. Арсенът в двете си форми е много токсичен, лесно се задържа от филтрационната среда и е много слабо подвижен. Същевременно концентрацията на двата инградента в течните емисии от хвостохранилището е висока.

4.1.7. Противофилтрационната завеса (бариера)

Главното предназначение на изградената през 2014 г. противофилтрационна завеса (бариера) е да възпрепятства подземното инфилтриране на замърсени води под и встрани от стената на хвостохранилището и последващото им дрениране в Чифлик дере. Основните характеристики, използвани при разработването на моделите за оценка на нейната ефективност, са следните: - едноредова противофилтрационна завеса с разстояние между сондажите 2.0 m, при приет радиус на разпространение на инжекционния разтвор 1.5 m, т.е. средна ширина на завесата 3.0 m; - дължина на инжекционните участъци – 32.6 m на участък № 1 и 28.0 m на участък № 2, т.е. обща дължина на противофилтрационна завеса 60.6 m; - дълбочина на противофилтрационна завеса – 25 m; -геодезични координати и коти на терена по осевата линия на противофилтрационната завеса; - проектен максимално допустим коефициент на филтрация на противофилтрационната бариера – $k_b = 5 \times 10^{-7}$ cm/s = 4.32×10^{-4} m/d.

4.1.8. Инфилтрационно подхранване

Инфилтрационно подхранване от валежите. Приетите в модела начални стойности за скоростта на инфилтрация W са определени въз основа на съставения общ воден баланс и при отчитане на водопропускливостта на приповърхностния слой в зоните на разкритие на детерминирани хидрогеоложки единици (Bredencamp, 1990). Изчисленията са направени като са приети средните стойности за годишната сума на валежите 724 mm и средногодишната температура на въздуха 10.1°C по данни на ХМС Медет. Представените в Табл. 13 стойности на скоростта на инфилтрация W за разкритите на земната повърхност части на хидрогеоложките единици са прецизирани след калибрирането на основния филтрационен модел FMB. С известна условност е прието, че концентрацията на сулфатни йони и арсен в атмосферните води е нищожно нулево, т.е. $c_w^{SO_4} = c_w^{As} = 0$ mg/l.

Инфилтрационен поток от дъното на хвостохранилището. Скоростта на инфилтрационния поток от източника W_p е определена след предварително проиграване моделите чрез вариране на нейните стойности. Това изследване показва, че моделите са устойчиви при максимална стойност на скоростта на инфилтрация на замърсените води $W_p = 1.0 \times 10^{-4}$ m/d. Съобразно представените в Табл. 15 данни може да се приеме, че средните стойности на концентрацията на SO₄ и As в замърсените води, дрениращи се под дъното на хвостохранилището са съответно $c_w^{SO_4} = 2111$ mg/l и $c_w^{As} = 0.3$ mg/l.

4.1.9. Концентрационно поле

В миграционните модели при дефиниране на концентрационното поле с определен резерв може да се допусне, че началните концентрации на ключовите замърсители SO_4 и As в незамърсените части от моделната област са нулеви. Същото допускане е валидно и за подземния поток, който преминава през граници на моделната област.

4.1.10. Механизъм на пренос на вещество

Основен механизъм за разпространение замърсителите е конвективният пренос, като определено значение имат и процесите на хидродинамична дисперсия, молекулярна дифузия и смесване. При това несорбируемите замърсители (SO_4) практически не взаимодействат с филтрационната среда и се движат със скорост равна на действителната скорост на подземния поток, а силно сорбируемите замърсители (As) се задържат от твърдата фаза и мигрират доста по-бавно. В моделите тези особености са симулирани чрез задаване на такива миграционни параметри, които точно характеризират поведението на всеки от изследваните ключови замърсители.

4.1.11. Калибровъчни условия

За калибриране на основния филтрационен модел са използвани резултатите от експлоатацията на системата за локален мониторинг в периода 2009 - 2011 г. В Таблица 16 са представени осреднени данни за водните нива (напорите) в използваните при калибрационните процедури наблюдателни пунктове.

Таблица 16. Осреднени данни за водните нива в периода 2009-2011 г.

| Наблюдателен пункт | Кота водно ниво (напор), m |
|--------------------|----------------------------|
| EMH1 | 653.26 |
| EMH2 | 612.07 |
| EMH3 | 577.98 |
| EMH5 | 561.0 |
| EMH6 | 663.0 |
| EMH7 | 631.0 |
| EMH9 | 661.25 |
| C-1 | 624.85 |
| C-2 | 666.24 |
| C-5 | 634.31 |
| C-6 | 676.18 |

4.2. Основен филтрационен модел FMB

Основният филтрационен модел FMB представлява тримерна симулация на структурата на подземния поток. При неговото съставяне са отчетени конкретните хидрогеоложки условия и всички външни въздействия, включително и хидравличните условия за проникване на замърсителите под дъното на хвостохранилището.

4.2.1. Композиране на модел FMB

Основните позиции и входните данни при композирането на модела са следните:

- Модел FMB е съставен съобразно постановките, изложени в концептуалния модел и посредством компютърна програма Modflow (Harbaugh et al, 2000; Harbaugh, 2005; McDonald and Harbaugh, 1988).

- Пространствената дискретизация на моделната област е направена като е използвана равномерна ортогонална мрежа с 124 реда, 108 колони и 3 моделни пласта – ML-1, ML-2 и ML-3 (Фиг. 17 и Фиг. 18). В моделен пласт ML-1 са детерминирани и 5 моделни зони MZ-1.1, MZ-1.2, MZ-1.3, MZ-1.4 и MZ-1.5 (Фиг. 17). Общата площ на моделната област е около 14 km².

- Моделните пластове и зони сравнително точно симулират пространственото разпространение на детерминираните хидрогеоложки единици от различен ранг. По-конкретно в първия моделен пласт ML-1 с моделни зони MZ-1.1, MZ-1.2, MZ-1.3, MZ-1.4 и MZ-1.5 са представени съответно пролувиално-делувиалния слабо водоносен хоризонт, пролувиалния водоносен хоризонт, алувиалния водоносен хоризонт, неогенския водоносен хоризонт и горната слабо водоносна зона в докамбрийски слабоводоносен комплекс. С моделни пластове ML-2 и ML-3 са моделирани другите две зони от същия водоносен комплекс, съответно средната слабо водоносна зона и долната много слабо водоносна зона.

- Релефът на долницата и горницата на моделните пластове и зони са съобразени с морфологичните особености на терена и пространствените форми на хидрогеоложките единици - Фиг. 19).

- В границите на моделните пластове и зони физичните, хидродинамичните и миграционните характеристики са постоянни. Използваните в модела стойности са дадени в Табл. 33. За коефициента на филтрация във всички моделни пластове е прието съотношението $k_x = k_y = 10k_z$.

- Регионалният поток е моделиран чрез симулиране на разход по външните граници на моделната област по схемата GHB (General Head Boundary). За началното разпределение на напорите във всяка моделна клетка и за напорите по границите са приети такива стойности, при които средният хидравличен градиент е в интервала 0.03-0.04. Използваната проводимост по границата е изчислена съобразно дебелината на моделния пласт и коефициента на филтрация в пласта, в която попада съответната моделна клетка.

- Реките и деретата са симулирани като тримерни обект със съответните геометрия на руслата и хидравлични характеристики на повърхностните течения. Зададени са с гранично условие от III род (River).

- Хвостохранилището е зададено с гранично условие от I род (Specified Head) в горните два моделни пласта.

- Противофилтрационната завеса (барьера) е моделирана с гранично условие от III род по схемата HFB (Horizontal Flow Barrier) в горните два пласта. Дълбочината ѝ е 25 m, ширината – 3.0 m, коефициентът на филтрация $k_b = 4.3 \times 10^{-4}$ m/d и проводимост на барьерата $T_b = 1.7 \times 10^{-5}$ d⁻¹

- Инфилтрационното подхранване от валежите е зададено като постоянна величина със съответни стойности, вариращи в диапазона от 3×10^{-4} m/d до 2.2×10^{-4} m/d за различните хидрогеоложки единици, във всички клетки от моделната област извън контурите на източника на замърсяване - хвостохранилището. В клетките, попадащи в границите на източника е зададена

постоянна скорост на инфилтрация 1×10^{-4} m/d. Инфилтрационното подхранване се въвежда с гранично условие подхранване (Recharge).

4.2.2. Калибриране на модел FMB

В така композирания модел са въведени 11 наблюдателни пункта от системата за локален мониторинг със зададени в тях стойности на измерения напор (Табл. 16). Получените големи разлики между изчислените с модела и измерените напори (Δe_g), достигащи в няколко пункта и до десетина метра, показва голямо несъответствие между моделираната и реалната пиезометрия.

За минимизиране на Δe_g са варирани началните стойности на напорите по границите, както и на предварително зададените стойности на инфилтрационното подхранване и коефициентите на филтрация. По тази схема са проиграни голям брой варианти като несъответствията в 11-те пункта са минимизирани до стойности $0.1 \text{ m} < \Delta e_g < 0.5 \text{ m}$. Полученото добро съответствие между фактичката и моделната пиезометрия е свидетелство за устойчивостта и достатъчната надеждност на модел FMB.

4.2.3. Резултати от моделирането на филтрационното поле

Определената с калибрания модел FMB тримерна (3D) структура на филтрационното поле в района на хвостохранилището е илюстрирана на Фиг. 20. На базата на представеното моделно решение може да се направят следните обобщения и изводи:

- Генералната посока на подземния поток е на юг. Подземните води почти изцяло се дренират в р. Тополница. В общ план средният хидравличен градиент е около 0.035.

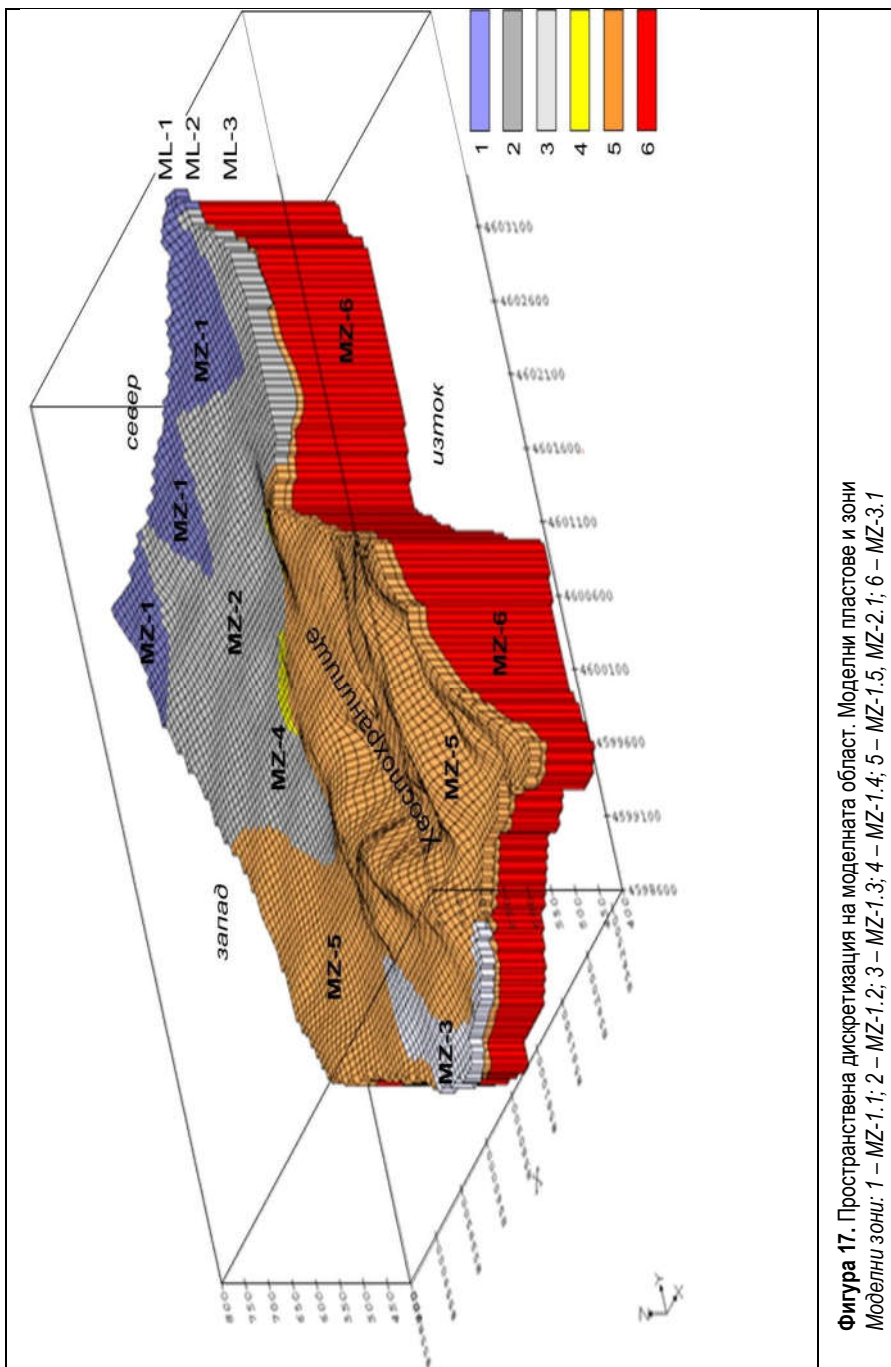
- Филтрационното поле е най-силно деформирано в участъците с дълбок ерозионен базис – около р. Воздол и дълбоките дерета, в района на хвостохранилището, южно от него и главно в зоната под стената и около противифилтрационната бариера. Тук хидравличния градиент е много висок – обикновено в диапазона 0.10-0.15, а под стената хвостохранилището и повече.

Тези специфични особености на филтрационното поле предпоставят благоприятни условия за миграция на постъпващите от хвостохранилището замърсители към р. Воздол. Същевременно, усложнена структура на потока около противифилтрационната бариера пречат за мигрирането на замърсители към Чифлик дере и в р. Тополница.

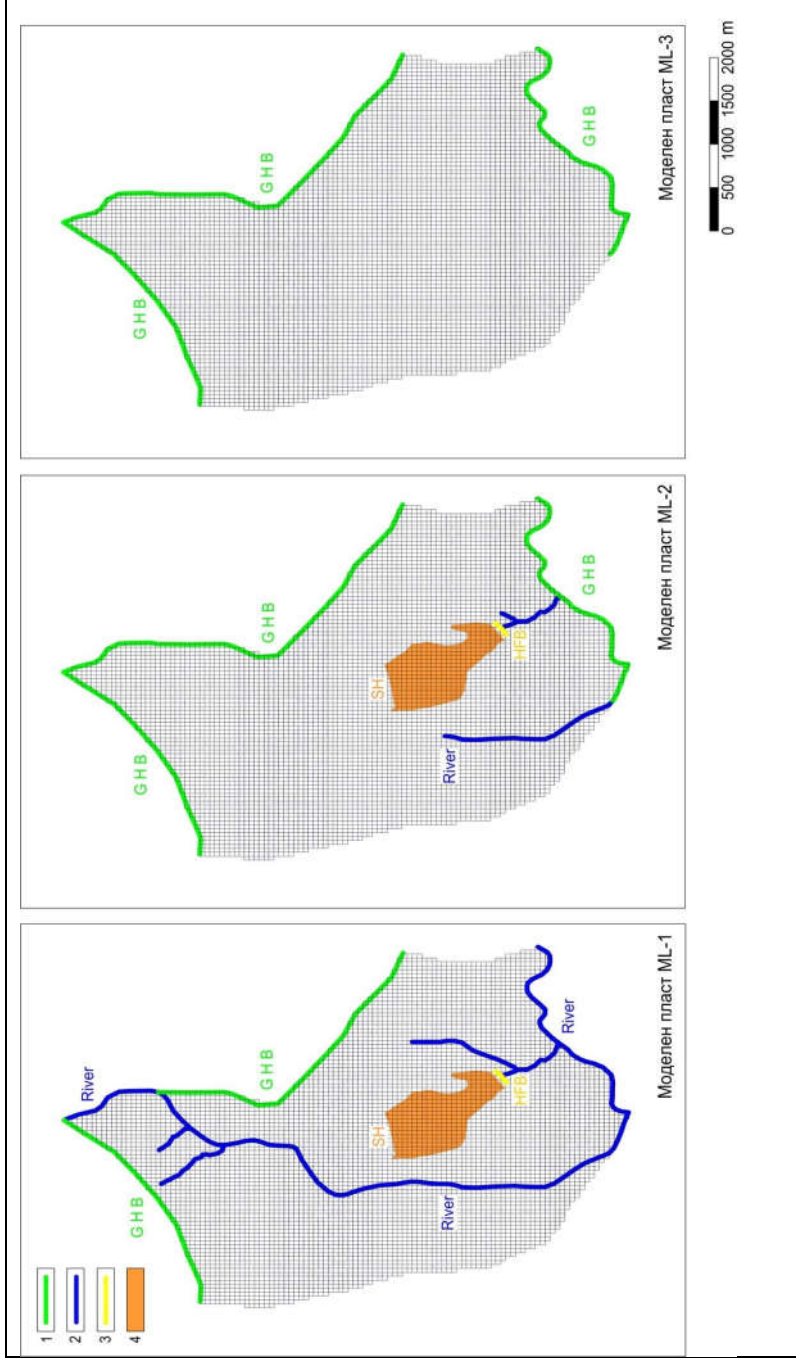
Детерминираното с основния филтрационен 3D модел пространствено разпределение на напорите, градиентите и скоростите на подземните води е прието за основа при разработването на миграционните модели.

4.3. Основни миграционни модели MTMB-SO₄ и MTMB-As

Основните миграционни модели представляват тримерна симулация на условията за движението в подповърхностното пространство и подземните води на изследваните ключови замърсители SO₄ и As. При тяхното съставяне е отчетена съществуващата хидрогеоложка и техногенна обстановка, както и мониторингови данни за замърсяването на подземните води от хвостохранилището до изграждането на противифилтрационната завеса.

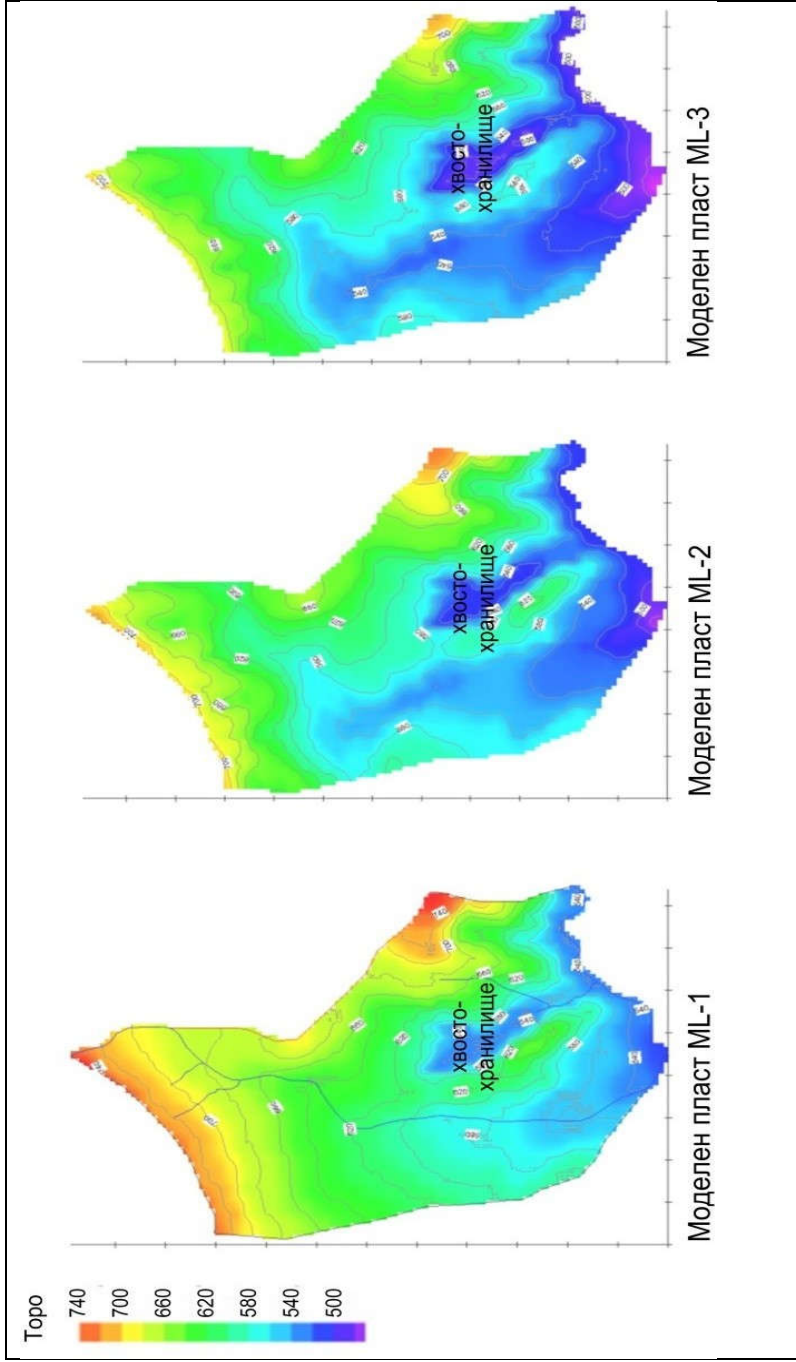


Фигура 17. Пространствена дискретизация на моделната област. Моделни пластове и зони
 Моделни зони: 1 – MZ-1.1; 2 – MZ-1.2; 3 – MZ-1.3; 4 – MZ-1.4; 5 – MZ-1.5; MZ-2.1; 6 – MZ-3.1

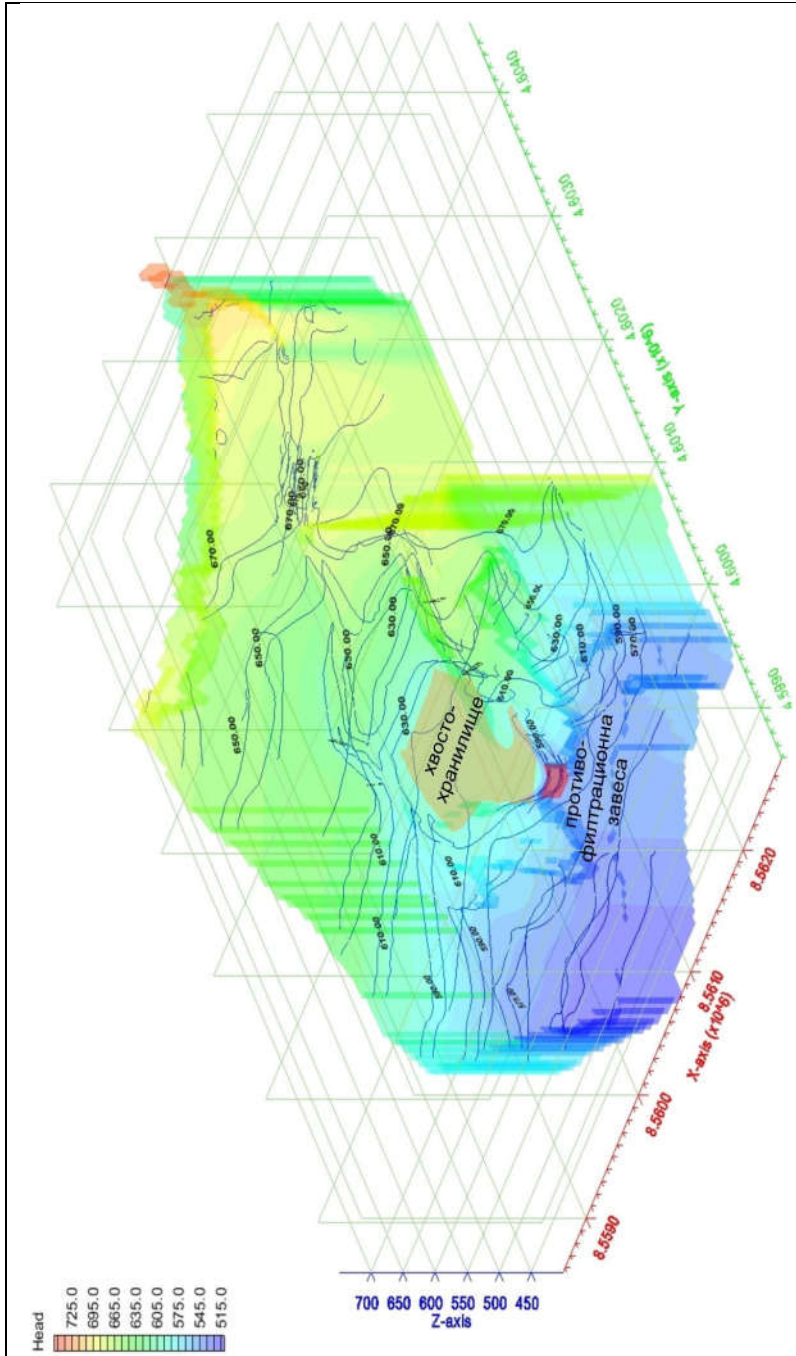


Фигура 18. Гранични условия в моделни пластове ML-1, ML-2 и ML-3

1 – Гранично условие General Head Boundary (GHB); 2 – Гранично условие River; 3 – Гранично условие Horizontal Flow Barrier (HFB); 4 –



Фигура 19. Релефни повърхнини на горницата (по абсолютни коти) на моделни пластове ML-1, ML-2 и ML-3



Фигура 20. Модел ГМВ. Естествена 3D структура на фільтраційного поле в району на дослідження об'єкт

4.3.1. Композиране на основните миграционни модели

Работната схема и входните данни, при които са съставени двата основни миграционни модела са следните:

- Моделите са съставени с програма MT3D-MS (Zheng and Wang, 1999; Zheng and Bennet, 2002) като е използвана направената по-горе пространствена дискретизация. Като входни данни са използвани получените с основния филтрационен 3D модел градиенти, скорости и водни количества.

- Изчислителната схема отчита конвективния пренос, обратимото елиминиране (сорбция-десорбция), механичната дисперсия, молекулярната дифузия и смесването.

- В моделните пластове и зони са зададени като начални осреднени за всяка хидрогеоложка единица стойности на обемната плътност ρ_b , активната порестост n_0 , надлъжната дисперсивност α_L , коефициента на молекулярна дифузия D_M и коефициентите на разпределение K_D , респ. сорбционната порестост n_0 , за двата ключови замърсителя SO_4 и As. При калибрационните процедури началните стойности на n_0 , n_s , α_L , D_M и K_D са прецизирани и в моделите са приети получените за тях изчислителни стойности, които са представени в Таблица 13 и Таблица 14.

- Напречната хоризонтална и вертикална дисперсивност (α_{TH} и α_{TV}) са определени от често прилаганото в моделните изследвания съотношение $\alpha_L = 10 \alpha_{TH} = 100 \alpha_{TV}$.

- В незамърсените части на моделната област са зададени нулеви начални концентрации на SO_4 и As. Начални нулеви стойности са зададени и в подземните потоци, постъпващи / напускащи границите на съответния модел.

- Хвостохранилището е зададено като непрекъснат площен източник на замърсяване. Зададено е като тримерен обект в горните два моделни пласта със съответните геометрични характеристики и постоянна концентрация c_p на ключовите замърсители SO_4 и As. Зададените концентрации на съответния замърсител в основните миграционни модели са:

$$\sim c_p^{SO_4} = 2111 \text{ mg/l в модел MTMB-SO}_4;$$

$$\sim c_p^{As} = 0.3 \text{ mg/l в модел MTMB-As.}$$

- Моделната симулация обхваща периода до изграждането на изграждането на противифилтрационната завеса.

4.3.2. Калибриране на миграционните модели MTMB-SO₄ и MTMB-As

Основните миграционни модели са калибрирани спрямо реално измерените концентрации на ключовите замърсители в мониторинговите пунктове по периферията и главно под стената на хвостохранилището. За минимизиране разликата Δc между изчислените и измерените концентрации на замърсителите в наблюдателните точки са варирани стойностите на първоначално зададените в източника концентрации на SO_4 и As. Варирани са в тесни граници и първоначално зададените стойности на миграционните параметри на n_0 , n_s , α_L , D_M и K_D . След проиграване на голям брой варианти в модел MTMB-SO₄ несъответствията са минимизирани до стойности $5 \text{ mg/l} < \Delta c^{SO_4} < 25 \text{ mg/l}$, а в модел MTMB-As – до стойности $0 \text{ mg/l} < \Delta c^{As} < 0.01 \text{ mg/l}$. Така на практика е постигнато много добро съответствие между фактичката и моделната

концентрация на замърсителите в подземните води към момента преди построяване на противифилтрационната завеса.

4.3.3. Резултати от моделирането на условията за миграция на SO_4 и As

Посредством разработените миграционни модели MTMB- SO_4 и MTMB-As са съставени карти замърсяването на подземните води от хвостохранилището със сулфатни йони и арсен – Фиг. 21 и Фиг. 22. Те нагледно илюстрират обхвата и степенята на замърсяване на докамбрийския слабо водоносен комплекс (моделни пластове ML-2 и ML-3) преди изграждане на противифилтрационната завеса.

Въз основа на представените на Фиг. 21 и Фиг. 22 моделни решения могат да се направят следните по-важни изводи:

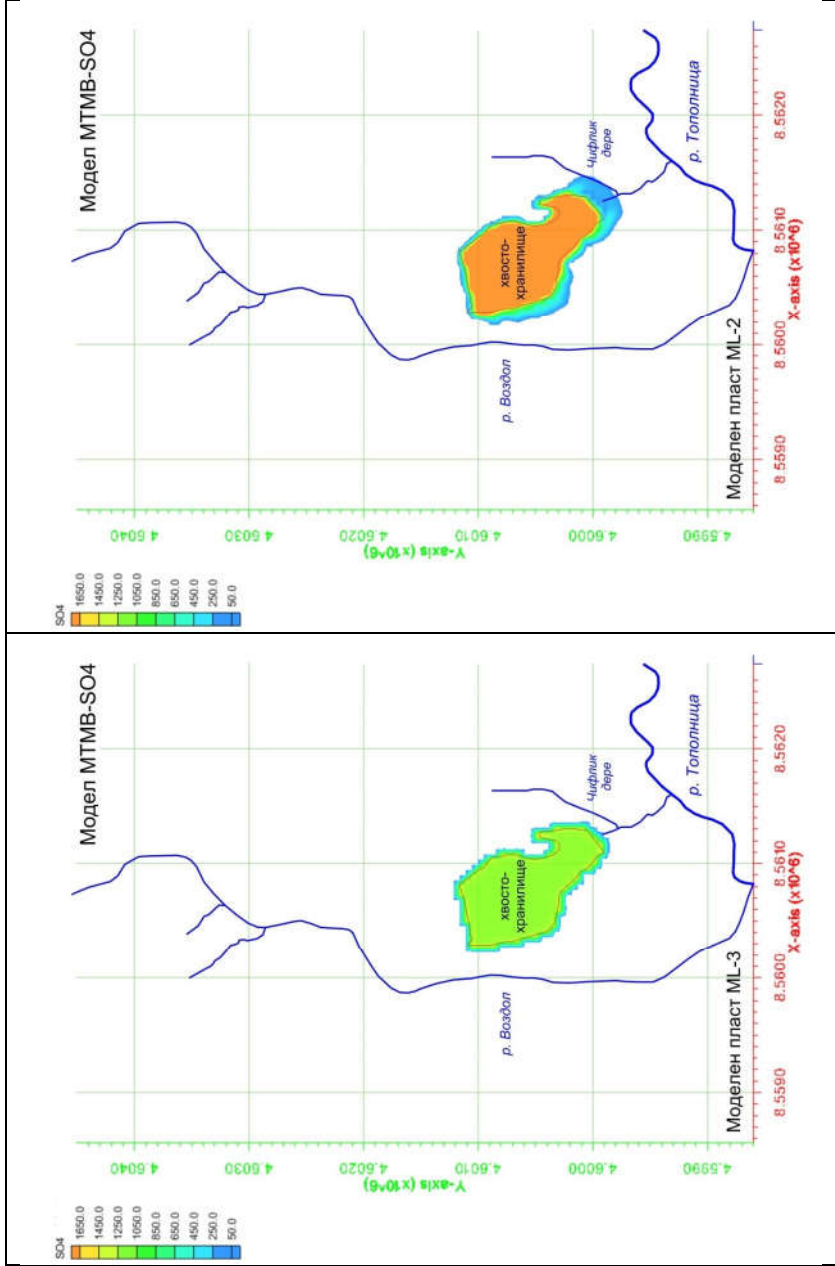
- Посоката и скоростта на движение на постъпилите от хвостохранилището замърсители основно се определя от структурата на филтрационното поле и в много по-малка степен от концентрационните разлики. Важни фактори, ограничаващи миграционните процеси са водопропускливостта на средата и типа на замърсителя.

- Замърсената със SO_4 зона маркира максимално възможния обхват на замърсяването на подземните води от хвостохранилището преди построяване на защитната бариера (Фиг. 21). Съвсем логично най-замърсени са горните водопропускливи части на докамбрийския комплекс. Тук замърсената зона обхваща широка ивица встрани от хвостохранилището, която е най-широка (около 200-250 m) под стената в югоизточна посока по дерето и достига до Чифлик дере. Замърсената зона се разширява и на югозапад към р. Воздол, където достига широчина 100-150 m и повече. В тези очертания концентрацията на SO_4 варира в твърде широк диапазон, обикновено между 50 и 1200 mg/l, рядко повече. В дълбочина, в моделен пласт ML-3, замърсяването рязко намалява по размери и интензитет.

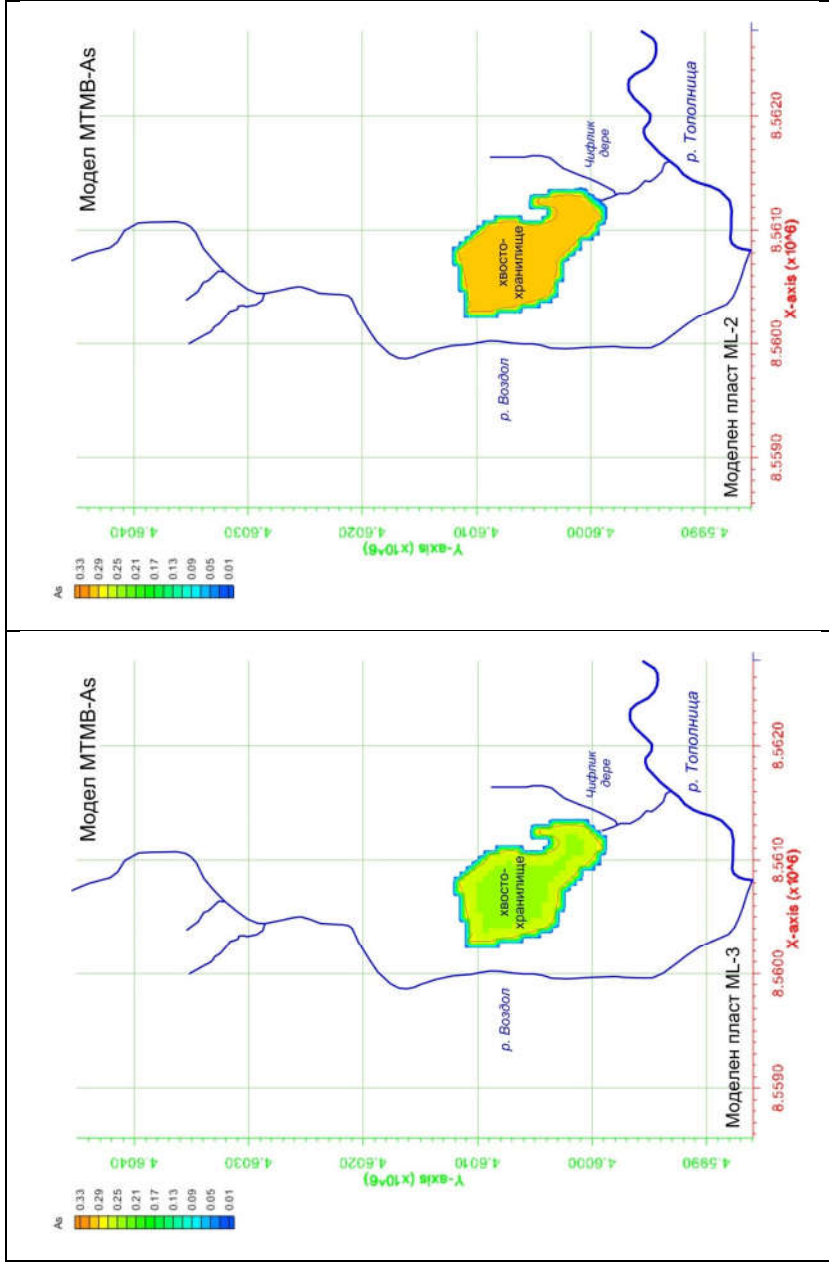
- Замърсената с As зона очертава границите най-интензивното замърсяване на подземните води (Фиг. 22), където може да присъстват и други, постъпили от хвостохранилището тежки метали, както и конвенционални замърсители в много високи концентрации. Замърсената зона около източника е много тясна. Единствено по-широка е в горната част на докамбрийския комплекс, под стената и в западна посока, където достига широчина около 30-40 m. Тук концентрацията на As е обикновено в границите от 0.01 до 0.1 mg/l, а в непосредствена близост до хвостохранилището и доста по-висока. В дълбочина обхватът и интензивността на замърсяването на подземните води с As намалява.

- Модел MTMB- SO_4 показва, че мигриращите под стената и встрани от нея замърсители от хвостохранилището са довели до ограничено по размер замърсяване на подземните води, като част от тях вече се дренират в първия реципиент Чифлик дере и оттам в р. Тополница. В случая в речните води постъпват конвенционални замърсители в сравнително ниски концентрации, но след един по-дълъг период може да се очаква и замърсяване с тежки метали. Това потвърждава необходимостта от изградената през 2014 г. противифилтрационна завеса, която да препратва развитието на тези негативни процеси.

Основните миграционни модели MTMB- SO_4 и MTMB-As са използвани като базова рамка при разработването на прогнозните модели за оценка ефективността на противифилтрационната завеса.



Фигура 21. Основен миграционен модел MTMB-SO4. Карта на замърсяването на подземните води със сулфатни йони преди изграждане на противофилтрационната завеса



Фигура 22. Основен миграционен модел MTMB-As. Карта на замърсяването на подземните води с арсен преди изграждане на противофилтрационната завеса

4.4. Прогнозни миграционни модели

Прогнозните миграционни модели са изцяло базирани на основния филтрационен модел FMD и основните миграционни модели MTMB-SO₄ и MTMB-As. Получените моделни решения за концентрационното поле посредством MTMB-SO₄ и MTMB-As са използвани като начални условия при съставяне на прогнозните модели. Прогнозата е направена за 100 годишен период*.

* Забележка: На фигурите са представени моделните решения за плътното разпределение на концентрациите на SO₄ и As в моделни пластове ML-2 и ML-3 (фиг. 39 до 49 са представени само в дисертационния труд).

Главните задачи на съставените прогнозни модели са:

(1) Да се направи количествена оценка на ефективността на противифилтрационната завеса за ограничаване миграцията на постъпващите от хвостохранилището замърсители към Чифлик дере и р. Тополница.

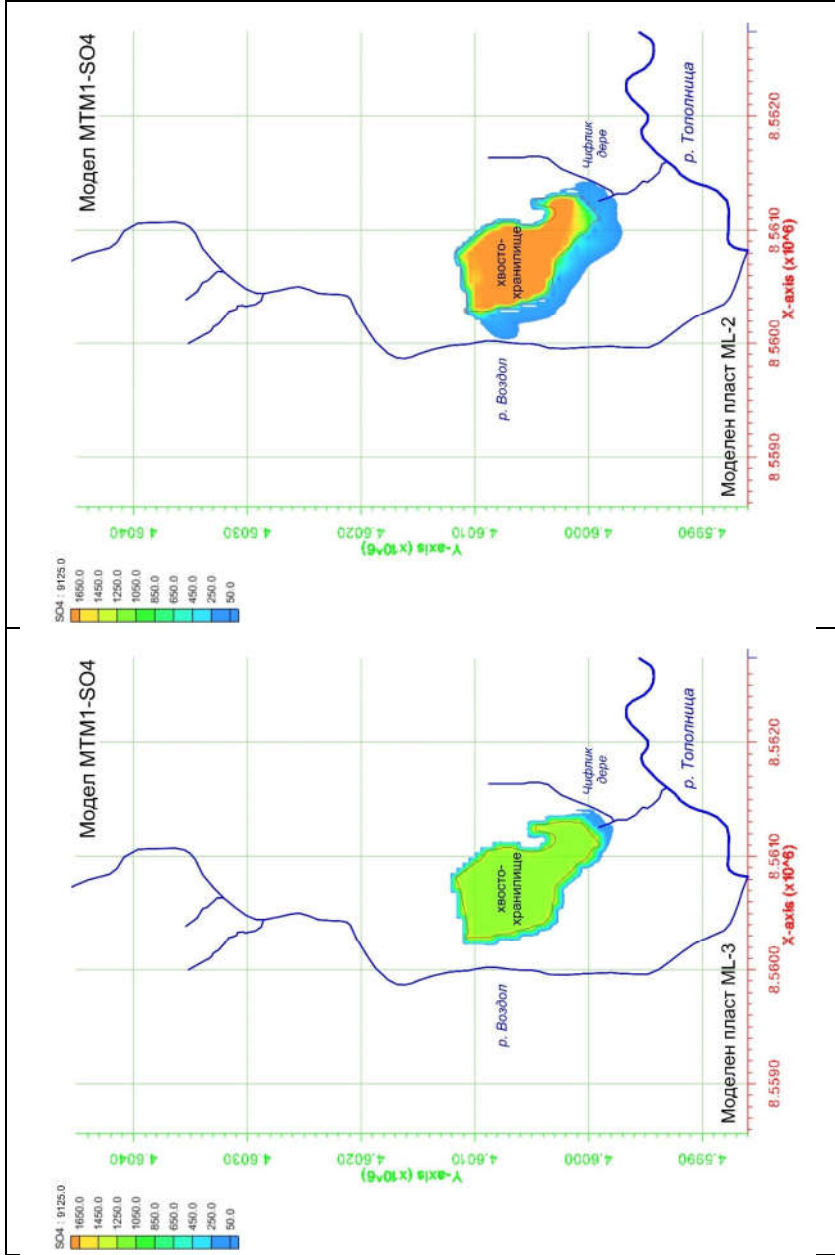
(2) Да се направи дългосрочна прогноза за размерите и степента на замърсяване на подземните води от хвостохранилището.

С цел изпълнението на тези задачи са съставени четири прогнозни модела, с които са симулирани два основни сценария за развитието на миграционните процеси. Първият сценарий разглежда поведението на ключовите замърсители SO₄ и As при допускане, че няма противифилтрационната завеса. Вторият сценарий изследва промените в поведението на SO₄ и As при допускане, че противифилтрационната завеса е изградена.

Основните допускания в прогнозните модели са:

- Течните емисии постъпват по цялата площ на хвостохранилището.
- Замърсителите, съдържащи се в течните емисии, се инфилтрират непрекъснато и безпрепятствено в подповърхностното пространство.
- Математическата симулация е направена при отчитане на процесите на конвективния пренос, обратимото елиминиране (сорбция-десорбция), механичната дисперсия, молекулярната дифузия и смесването.

Получените прогнозни решения са визуализирани посредством концентрационни карти, отразяващи обхвата и степента на замърсяване на подземните води при различни сценарии, ключови замърсители и прогнозни времена. Те са илюстрирани с 12 броя фигури, като на фигура 38 (Фиг. 23) са показани получените резултати само за 25 годишен период в *моделни пластове ML-2 и ML-3*. Останалите фигури от Фиг.39 до Фиг.49 са представени в дисертационния труд.



Фигура 23. Прогнозен миграционен модел МТМ1-SO4 (без противофилтрационна завеса) . Карта на замърсяването на подземните води със сулфатни йони при изчислително време 25 години

4.5. Анализ на резултатите от моделните изследвания. Изводи

Въз основа на получените с математическите модели решения могат да се направят следните аналитични оценки и изводи относно замърсяването на подземните води от хвостохранилище „Челопеч“ и ефективността на изградената противифилтрационна завеса:

- Постъпилите в подповърхностното пространство замърсители мигрират както латерално, така и в дълбочина. В план посоката и скоростта на миграционните процеси се контролират от структурата на филтрационното поле, респ. от пространственото разпределение на хидравличните напори и градиенти. Фронтът на замърсяване се движи на юг и югозапад, следвайки естествената посока на движение на подземните води. В разрез вертикалният пренос на вещество се определя главно от плътностните разлики между замърсените подземни води и лежащите под тях незамърсените води.

- Първоначално замърсяването доминира в първия приповърхностен моделен пласт, а впоследствие постепенно заема и значителни части от втория и третия моделен пласт. Същевременно, шлейфът на замърсената зона във всеки следващ пласт се отмества по посока на подземния поток.

- Замърсяването засяга най-големи по площ пространства в горните силно изветрели и напукани части на докамбрийския слабо водоносен комплекс. В дълбочина поради слабата водопропускливост на скалния масив то е ограничено в по-тесни граници, но с нарастваща във времето интензивност.

- Обхватът и степента на замърсяване на подземните води е в тясна връзка с типа на постъпващите от източника замърсители. Според тяхната миграционна способност (подвижност) и пространственото им разпространение се диференцират две основни групи – силно подвижни замърсители (SO_4 , Cl и др.) и слабо подвижни замърсители (As, Ni, Cd, Cu, Fe и др.). В този аспект получените моделни решения и направените прогнози за поведението на ключовите замърсители SO_4 и As показват следните важни закономерности:

~ Силно подвижните замърсители са консервативни, на практика не се задържат от филтрационната среда и се движат със скоростта на подземния поток. Границите на замърсените с тях зони са динамични и засягат пространства с големи размери под дъното на източника и встрани от него. Те маркират максималния обхват на възможното замърсяване на подземните води от хвостохранилището и определят времето за достигане на фронта на замърсяване до най-близките реципиенти - реки или повърхностни водоеми, в случая Чифлик дере.

~ Слабо подвижните замърсители са много реактивни, активно взаимодействат или се задържат изцяло от филтрационната среда, влияят се силно от геохимичните бариери, което предопределя и много ограничената им миграционна способност. Замърсените зони обхващат площта под дъното на хвостохранилището и тесни ореоли около неговите граници. Поради слабата си подвижност тези замърсители имат индикаторно значение за локализиране на зоните с най-интензивно и дълготрайно замърсяване.

- До изграждане на противифилтрационна завеса през 2014 г. замърсяването на подземните води от хвостохранилището има следните количествени параметри:

~ Замърсената със SO_4 зона в горната част на докамбрийския комплекс заема широка ивица встрани от хвостохранилището, която в югоизточна посока е около 200-250 m и достига до Чифлик дере, а на запад към р. Воздол е около 100-150 m. В тези граници концентрацията на SO_4 варира в широк диапазон – между 50 и 1200 mg/l, рядко повече. На по-голяма дълбочина в скалния масив (над 25-30 m) замърсяването на подземните води значително намалява.

~ Замърсената с As зона обхваща площта под дъното на източника и много тясна ивица около него. По-широка е само в горната част на докамбийския комплекс, като в участъка под стената и в югозападна посока е около 30-40 m. Встрани от хвостохранилището концентрацията на As е в диапазона 0.01-0.1 mg/l, а в непосредствена близост до неговите граници е доста по-висока. В дълбочина размерите и интензивността на замърсяването силно намалява.

- При отсъствие на противифилтрационна завеса прогнозните изчисления за период от 100 г. показват следното развитие на миграционните процеси:

- След 100 г. замърсената със SO₄ зона ще се разшири значително, следвайки посоката на подземния поток. На югозапад фронтът на замърсяване ще се премести на около 450-500 m от източника, а на югоизток – на около 250 m. При това в резултат на смесване и разреждане с чисти пластови води концентрацията на SO₄ в замърсената вече зона ще спадне до стойности в интервала между 50 и 450 mg/l, рядко повече. В дълбочина замърсяването се очаква да е в по-тесни граници, но в непосредствена близост до източника и под него концентрациите ще достигат до 800-900 mg/l.

За прогнозния период замърсеният със SO₄ подземен поток постепенно ще достига до най-близките реципиенти, първоначално до Чифлик дере, а след около 70-80 г. и до р. Воздол. Концентрацията на SO₄ в дренажиращите се в реките замърсени подземни води ще е относително ниска – 50 до 200 mg/l, а водните количества много малки.

- В края на прогнозния период (100 г.) замърсената с As зона също ще се разшири, макар и в по-тесни граници, в посока към р. Воздол и Чифлик дере. В горната част на докамбийския комплекс фронтът на замърсяване ще бъде на около 110-180 m на югозапад от хвостохранилището, а в югоизточна посока – на 120-150 m. Концентрацията на As ще варира в диапазона 0.01-0.12 mg/l, като в близост до източника достига до 0.20 mg/l и повече. В дълбочина замърсената зона ще обхваща много по-тесни граници – площта под дъното и в много тясна ивица около източника, но концентрациите ще бъдат най-често около 0.20-0.25 mg/l. Очертаните граници маркират зоната на най-интензивно замърсяване, в която присъстват целия спектър на изтичащите от хвостохранилището замърсители, в това число силно подвижните конвенционални замърсители (Cl, SO₄ и др.) в големи концентрации, както и слабо подвижните, но много токсични тежки метали (As, Ni, Cd, Cu, Fe и др.).

В рамките на прогнозния период замърсените с As води ще достигнат единствено до дерето под стената на хвостохранилището, заустващо се в Чифлик дере. Количеството на дренажиращите се в дерето замърсени води е много малко, а концентрацията на As ще е минимална – около 0.01 mg/l.

- При наличие на противифилтрационна завеса направената прогноза за период от 100 години показва следната картина на замърсяването на подземните води от хвостохранилището:

- Противифилтрационната завеса при зададените проектни параметри много силно ще деформира филтрационното поле в района под стената на хвостохранилището. Преминаващите под стената и встрани от нея замърсени води, които в ненарушени условия се движат с естественния подземен поток на югоизток, срещайки хидравличната бариера се насочват на югозапад и изток, отвъд водосбора на Чифлик дере.

~ Прогнозните моделни решения, отчитащи новите хидравлични условия показват, че постъпващите от хвостохранилището замърсители ще мигрират главно на югозапад, по посока на р. Воздол. След около 10-15 г. замърсените подземни води в дерето под стената ще се изчистят в резултат на смесване и разреждане с чисти пластови води.

- Така противифилтрационната завеса ще изпълни ролята на защитна бариера, която ще възпрепятства и възможностите за дренажирането на замърсени подземни води към Чифлик дере и р. Тополница.

- В рамките на прогнозния период (100 г.), отвъд зоната на въздействие на противифилтрационната завеса замърсяването на подземните води от хвостохранилището ще протече по същия сценарий, който разглежда развитието на миграционните процеси при отсъствие на завеса.

V. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В случаи на замърсяване на водоносни пластовете на подземни води в следствие на филтриране на води от хвостохранилища (най-вече през дъното на хвостохранилището или при основната стена/стени поради големия напор), е възможна употреба на противифилтрационна бариера в комбинация с традиционни решения като циментация в дълбочина и дренажни системи, или самостоятелно.

2. Геоложката и хидрогеоложката характеристика на района предполагат наличие на различни източници на подпочвени води, като в зависимост от конкретните условия, качествата на повърхностните води могат да бъдат повлияни.

3. Екологичния мониторинг на повърхностните води по отношение – електропроводимост, сулфати, манган, желязо, и други тежки метали в периода преди (2013г.) и след поставяне (2014г.) на противифилтрационната завеса, показват значително снижение на стойностите на замърсителите по отношение на дренажните и скатовите води. Тези по-ниски стойности се отразяват и благоприятно на водоприемника р. Тополица след точката на заустване.

4. Установена е хидродинамиката на потока при преминаване на водите през различни филтрационни материали в лабораторни условия. Измерени са загубите на налягане при различен дебит и височина на филтърния слой. Направена е интерполация за различните варианти на пълнеж и при различен дебит и височина на филтърния материал.

5. Инжекционната завеса се състои от два инжекционни участъка, като са реализирани 35 сондажа с обща дълбочина 880 m. При инжектирането всички сондажи от първа и втора поредност и всички контролни сондажи се водонагнетени, за да се установява водопропускливостта на скалната основа.

6. Разработените филтрационни и миграционни модели показват, че замърсяването на подземните води от хвостохранилището до 2014 г. ще обхване значителна площ от докамбрийския слабо водоносен комплекс под неговото дъното и встрани от него. На ЮИ замърсените подземни води достигат на 200-250 m от стената на хвостохранилището, като част от тях започват да се дренират в първия реципиент Чифлик дере. Към този момент в речните води постъпват само най-подвижните конвенционални замърсители (SO₄, Cl и др.), които са в ниски концентрации и незначителни като количества. Но съществува тенденция, че след по-дълъг период в реката ще се дренират и замърсени води, съдържащи слабо подвижни замърсители от групата на тежките метали (As, Ni, Cd, Cu, Fe и др.). Това потвърждава и необходимостта от изграждане на противифилтрационна завеса.

7. Съставените прогнозни миграционни модели, които не отчитат действието на изградената противифилтрационна завеса показват, че ако тя не бъде изградена след период от около 100 г. замърсяването с конвенционални замърсители ще достига не само до Чифлик дере, но и до р.

Воздол. Същевременно, за по-малко от 20 г. в Чифлик дере се очаква да се дренират и замърсени с тежки метали води.

8. Прогнозните модели, включващи противифилтрационната завеса с нейните проектни параметри показват, че тя ще възпрепятства бъдещо замърсяване на подземните води на югоизток от стената на хвостохранилището, както и на възможностите за дрениране на замърсени води в Чифлик дере и р. Тополница. Отвъд зоната на действие на защитната завеса в следващите 100 г. замърсяването на подземните води ще протече по сценария, разглеждащ развитието на миграционните процеси при отсъствие на завеса.

В заключение трябва да се каже, противифилтрационните завеси са преспективни системи за превенция на замърсяването на повърхностни и подземни води.

VI. ПРИНОСИ

1. На база на проведен екологичен мониторинг, е установено влиянието на противифилтрационна завеса по отношение миграцията на замърсители присъстващи в отпадъкохранилище за минни отпадъци в повърхностни води.

2. При различни варианти на материали, които биха могли да се поставят в зоната на противифилтрационната завеса, са получени оригинални аналитични изрази, даващи връзка между коефициента на местни съпротивления и критерия на Рейнолдс (Re), като е установена и хидродинамиката на потока при преминаването през материали с различни филтрационни свойства.

3. Предложен и апробиран е методичен подход за оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от хвостохранилище „Челопеч“ и действието на противифилтрационната завеса посредством математическо моделиране.

4. Разработени са оригинални хидрогеоложки числени 3D модели на условията за миграция на постъпващите от хвостохранилището силно подвижни и слабоподвижни замърсители по примера SO₄ и As.

5. Направени са компютърни симулации за период от 100 г. за прогнозиране на размерите и степента на замърсяване на подземните води от хвостохранилището и за оценка на ефективността на противифилтрационната завеса.

VII. ПУБЛИКАЦИИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Плочев С., Николова К., Ангелов А. и Браткова С., 2011, Анализ на разпространението на замърсители в р. Габра в резултат от антропогенното въздействие на мина "Чукурово", BULCAMC 2011, Автоматизация на добива и преработката на енергийни, рудни и нерудни суровини, НТС по минно дело, геология и металургия, София, ISSN: 1314-4537.

2. Angelov A., Loukanov A., Bratkova S., Nikolova K. and Plochev S., 2010, Estimation of rock filter for treatment of manganese in acid mine drainage waters , International scientific symposium "Universitaria Simpo 2010", University of Petroshani, October 14-15, pp.5-8, ISSN 1842 – 4449.
3. Alexandre Loukanov, Anatoli Angelov, Sotir Plochev, Svetlana Bratkova, Katerina Nikolova and Seiichiro Nakabayashi, 2010, Frontiers of heavy metals detection in acid mine water: synergy of the advanced nano-bio-sensor technology, International scientific symposium "Universitaria Simpo 2010" , University of Petroshani, October 87-92, pp.5-8, ISSN 1842 – 4449.
4. Plochev S., Angelov A., Bratkova S., Ivanov R., 2013, Modeling of the contaminants diffusion in groundwaters in the area of TMFS, Analele Universitatii "Constantin Brancisiu" din Targu Jiu 3, 139-143, ISSN: 1842-4856.
5. Petia Genova, Anatoliy Angelov, Rosen Ivanov, Sotir Plochev, 2014, Contemporary approach for treatment of leachate from landfills for solid waste, Proceedings of National scientific and technical conference with international participation "Automation in mining industry and metallurgy", BULCAMC '14, 06-07 November 2014, 144-149, ISSN 1314-4537.
6. Sotir Plochev, Stefan Zeinelov, 2020, Pollution of groundwater and surface water from the mining industry, Journal of Mining and Geological Sciences, Volume 63, 89-94, ISSN 2683-0027 (online).

SUMMARY

One of the main environmental issues related to the mining industry is the generation of wastewater contaminated with heavy metals, sulfates, arsenic, and etc. The aim of the present work is to prepare an analysis for the contamination with pollutants typical for the underground and surface water in the area of the anti-filtration barriers, located after the wall of a tailing dam for mining wastes. An example of an anti-filtration barrier in the area of a tailing dam for mining waste from Chelopech mine was used in the research. In addition to the large amount of a collected data from the applied mathematical models, were made a lot of laboratory experiments associated with the use of anti-filtration barriers. Materials, which could reduce the pollution spread were studied. Original hydrogeological numerical 3D models of the migration of highly mobile (SO₄) and low-mobile pollutants (As) from the tailings have been developed. Computer simulations for a period of 100 years to predict the dimensions and the degree of the pollution from the tailing were made and the effectiveness of the barrier was evaluated.

Topic: MODELING OF THE SPREAD OF POLLUTANTS IN THE AREA OF AN ANTI-FILTRATION BARRIER

Author: Sotir Kamenov Plochev