

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН**

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

Кафедра Геология нефти и газа

Габдулина Шынар Ибрагимовна

Изучение влияния эксплуатации хвостохранилища Сульфидной фабрики  
Актогайского ГОКа на химический состав и минерализацию подземных вод с  
построением модели массопереноса загрязняющих веществ на базе Visual  
Modflow Flex

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Специальность 6М075500 – Гидрогеология и инженерная геология

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Габдулина Шынар Ибрагимовна

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	Изучение влияния эксплуатации хвостохранилища Сульфидной фабрики Актогайского ГОКа на химический состав и минерализацию подземных вод с построением модели массопереноса загрязняющих веществ на базе Visual Modflow Flex
Направление подготовки	6M075500 – Гидрогеология и инженерная геология

Научный руководитель  
Кандидат геолого-минералогических наук  
ассоциированный профессор

Запбаров М.Р.

" 05 " июня 2019 г.

Рецензент  
PhD доктор

Сотников Е.В.

" 03 " июня 2019 г.

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Нормоконтроль  
Лектор PhD доктор  
Кульдеева Э.М.

" 03 " июня 2019 г.

Заведующий кафедрой  
Геологии нефти и газа  
Кандидат геолого-минералогических наук  
Енселбаев Т.А.

подпись Ф.И.О.  
" 05 " июня 2019 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И.Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова  
Кафедра Геологии нефти и газа  
6М075500 – Гидрогеология и инженерная геология

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
Геологии нефти и газа  
кандидат геолого-  
минералогических наук

Енсеппбаев Т.А.

“ 05 ” июня 2019

г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту *Габдулиной Шынар Ибрагимовне*

Тема: *Изучение влияния эксплуатации хвостохранилища Сульфидной фабрики Актогайского ГОКа на химический состав и минерализацию подземных вод с построением модели массопереноса загрязняющих веществ на базе Visual Modflow Flex.*

Утверждена приказом Ректора Университета № 1603-м от "30" октября 2017г.

Срок сдачи законченной диссертации " 05 " июня 20 19 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: *геолого-гидрогеологическая информация, результаты мониторинга подземных вод*

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) изучить влияние эксплуатации хвостохранилища Сульфидной фабрики на химический состав и минерализацию подземных вод;*
- б) определить эффективность существующего противофильтрационного экрана хвостохранилища;*
- в) приложения.*

Перечень графического материала: *гидрогеологическая карта участка Актогай масштаба 1 : 25 000*

Рекомендуемая основная литература:




1 *Кузнецов Д.С. Моделирование структуры потоков подземных вод в многослойных водоносных системах. – Москва, 2004.*

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации


Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Общие сведения о районе работ	Декабрь 2017	
Геологическое строение и гидрогеологические условия месторождения Актогай	Май 2018	
Характеристика хвостохранилища Сульфидной фабрики	Декабрь 2018	

**Подписи**

Консультантов и нормконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование разделов	Консультанты И.О.Ф. (уч.степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Результаты мониторинга за состоянием подземных вод в зоне влияния хвостохранилища	М.Р. Заппаров Кандидат геолого-минералогических наук, ассоц.проф.	05.06.2019	
Математическое моделирование массопереноса загрязняющих веществ из хвостохранилища в подземные воды	М.Р. Заппаров Кандидат геолого-минералогических наук, ассоц.проф.	05.06.2019	
Нормоконтролер	Э.М. Кульдеева PhD доктор, лектор	05.06.19	

Научный руководитель  (подпись) Заппаров М.Р.

Задание принял к исполнению обучающийся  Габдулина Ш.И.  
(подпись)

Дата " 05 " июня 2019 г.

## **АНДАТПА**

Тау-кен өндіру кәсіпорындарын салу және пайдалану қалдық қоймаларының астында техногендік сулардың ағу күмбездерінің пайда болуына байланысты жер асты суларының гидрохимиялық режимінің бұзылуына әкелуі мүмкін. Бұл жағдайларда табиғи жер асты суларының техногендік ағындармен біртіндеп ауыстырылуы және олардың сапасының нашарлауы мүмкін. Осыған байланысты қоршаған орта сапасының өзгеруін өндірістік және экологиялық бақылау деңгейін арттыру қажеттілігі туындайды. Зерттелетін учаске шегінде гидросфераның жағдайын техникалық бақылау шараларын жақсарту нұсқаларының бірі Visual MODFLOW Flex мысалында жерасты суларын компьютерлік модельдеудің бағдарламалық қамтамасыз етуін қолдану болып табылады.

Осы магистрлік диссертацияның мақсаты жұмыс учаскесінің гидрогеологиялық жағдайларының өзгеруін болжау және Ақтоғай тау-кен байыту комбинатының сульфидті фабрикасының қалдық қоймасының әсері есебінен жер асты суларының химиялық құрамының өзгеруін және минералдануын бағдарламалық симуляциялау үшін сандық модель құру болып табылады.

Сандық модельдеудің міндеті ластаушы заттардың массатасымалдауын моделдеуден тұрады. Әзірленген модель Су ресурстарын қорғау және ұтымды пайдалану проблемаларын шешу үшін Балқаш мыс кен орындарының кен өндіруші кен орындарында практикалық қолданылуы мүмкін.

## **АННОТАЦИЯ**

Строительство и эксплуатация горнодобывающих предприятий могут привести к нарушению гидрохимического режима подземных вод в связи с образованием куполов растекания техногенных вод под хвостохранилищами. В этих условиях возможно постепенное замещение природных подземных вод техногенными стоками и ухудшение их качества. В связи с этим возникает необходимость повышения уровня производственного и экологического контроля изменения качества окружающей среды. Одним из вариантов улучшения мер технического контроля над состоянием гидросферы в пределах изучаемого участка, является применение программного обеспечения компьютерного моделирования подземных вод на примере Visual MODFLOW Flex.

Целью настоящей магистерской диссертации является построение численной модели для прогноза изменения гидрогеологических условий участка работ, и программная симуляция изменения химического состава и минерализации подземных вод за счет влияния хвостохранилища Сульфидной фабрики Актогайского горно-обогатительного комбината.

Задача численного моделирования заключается в моделировании массопереноса загрязняющих веществ. Разработанная модель может иметь практическое применение на горнодобывающих предприятиях Балхашского пояса медных месторождений для решения проблем защиты и рационального использования водных ресурсов.

## **ABSTRACT**

The construction and operation of mining enterprises can lead to the disturbance of the hydrochemical regime of the underground waters in connection with the formation of domes of spreading of the technogenic water under the tailings. In these circumstances, it is possible a gradual replacement of natural groundwater man-made drains and the deterioration of their quality. In this regard, there is a need to improve the level of production and environmental control of environmental quality changes. One of the options for improving the measures of technical control over the state of the hydrosphere within the study area is the use of software for computer modeling of groundwater on the example of Visual MODFLOW Flex.

The purpose of this master's thesis is to build a numerical model to predict changes in the hydrogeological conditions of the site and program simulation of changes in the chemical composition and mineralization of groundwater due to the influence of the tailings Sulfide factory Aktogay mining and processing plant.

The task of numerical simulation is to simulate the mass transfer of pollutants. The developed model can have practical application in the mining fields of the Balkhash belt of copper deposits to solve the problems of protection and rational use of water resources.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	8
1	Общие сведения о районе работ	10
1.1	Административное и географическое положение	10
1.2	Климат	11
1.3	Гидрография	12
1.4	Орография	13
2	Геологическое строение и гидрогеологические условия месторождения Актогай	14
2.1	Геологическое строение	14
2.2	Гидрогеологические условия	16
3	Характеристики хвостохранилища Сульфидной фабрики	22
3.1	Параметры и свойства хвостов	23
3.2	Гидрогеологические условия участка хвостохранилища	27
3.3	Специализированная мониторинговая сеть для изучения влияния эксплуатации хвостохранилища на окружающую среду	34
3.4	Результаты мониторинга за состоянием подземных вод в зоне влияния хвостохранилища	35
4	Математическое моделирование массопереноса загрязняющих веществ из хвостохранилища в подземные воды	38
4.1	Обзор программного обеспечения Visual MODFLOW Flex	39
4.2	Моделирование движения подземных вод и переноса загрязняющих веществ	41
	Заключение	57
	Список использованной литературы	58
	Приложение А	60
	Приложение Б	62
	Приложение В	64

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменения геологической среды под влиянием техногенеза является наиболее актуальной для осваиваемых территорий. Под воздействием инженерных сетей и сооружений различного назначения происходит существенная перестройка природных связей, которая в промышленных центрах может приводить к необратимым последствиям [1].

Методы производственного экологического мониторинга подземных вод в настоящее время быстро развиваются, в том числе методы изучения процессов фильтрации в водоносные пласты жидких отходов химической, нефтяной и горно-обогатительной отраслей промышленности. Особенно актуальным направлением изучения данных процессов является контроль и изучение степени воздействия на подземную гидросферу гидротехнических сооружений. Построение математических моделей позволяет в свою очередь давать количественную оценку загрязненной зоны и прогнозировать формирования области загрязнения в пределах изучаемого участка.

Цель работы. Изучение влияния эксплуатации хвостохранилища Сульфидной фабрики Актогайского ГОКа на химический состав и минерализацию подземных вод с построением модели массопереноса загрязняющих веществ на базе Visual Modflow Flex.

В соответствии с целью работы ставятся следующие задачи работы:

- 1) Определить эффективность существующего противотриационного экрана хвостохранилища,
- 2) На основе имеющихся литературных, проектных и экспериментальных данных выявить основные триационные и гидрохимические процессы, происходящие при отведении хвостов обогащения,
- 3) Продемонстрировать возможности методов математического моделирования для проведения производственного экологического контроля.

Результаты моделирования процессов массопереноса загрязняющих веществ позволит решать проблемы защиты подземных вод в районе действия хвостохранилища Актогайского ГОКа. Кроме того, результаты моделирования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации хвостохранилищ горнодобывающих предприятий расположенных в аналогичных условиях.

Научная новизна магистерской диссертации состоит в следующем: решена миграционная задача методами численного моделирования с использованием модуля MT3DMS на базе MODFLOW, позволяющей моделировать конвективный перенос, дисперсию и химические реакции веществ в потоке подземных вод. Миграционная модель построена на основе триационной модели потока с добавлением параметров переноса на основе экспериментальных данных и граничных условий.



Актуальность работы определяется возможностью использования результатов магистерской диссертации для создания систем поддержки принятия решений в области контроля и прогноза качества подземных вод.

В качестве основной теоретической базой для диссертационной работы использовалась работа В.А. Мироненко, В.Г. Румынина «Проблемы гидрогеоэкологии. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов», Москва, 2002 г.

В качестве методологической основы использована Инструкция гидрогеологического моделирования для оценки воздействия мероприятий по освоению природных ресурсов (Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities, British Columbia, Ministry of Environment, Canada, 2012).

Практической базой диссертационной работы являются собранные в рамках научно-исследовательской работы материалы проведенных ранее гидрогеологических и инженерно-геологических исследований изучаемой территории.

Необходимость выполнения магистерской диссертации обоснована необходимостью определить эффективность использования математических моделей при описании основных процессов миграции загрязняющих веществ и изменении минерализации подземных вод на участках размещения хвостов обогащения добывающей отрасли.

## АНДАТПА

Тау-кен өндіру кәсіпорындарын салу және пайдалану қалдық қоймаларының астында техногендік сулардың ағу күмбездерінің пайда болуына байланысты жер асты суларының гидрохимиялық режимінің бұзылуына әкелуі мүмкін. Бұл жағдайларда табиғи жер асты суларының техногендік ағындармен біртіндеп ауыстырылуы және олардың сапасының нашарлауы мүмкін. Осыған байланысты қоршаған орта сапасының өзгеруін өндірістік және экологиялық бақылау деңгейін арттыру қажеттілігі туындайды. Зерттелетін учаске шегінде гидросфераның жағдайын техникалық бақылау шараларын жақсарту нұсқаларының бірі Visual MODFLOW Flex мысалында жерасты суларын компьютерлік модельдеудің бағдарламалық қамтамасыз етуін қолдану болып табылады.

Осы магистрлік диссертацияның мақсаты жұмыс учаскесінің гидрогеологиялық жағдайларының өзгеруін болжау және Ақтоғай тау-кен байыту комбинатының сульфидті фабрикасының қалдық қоймасының әсері есебінен жер асты суларының химиялық құрамының өзгеруін және минералдануын бағдарламалық симуляциялау үшін сандық модель құру болып табылады.

Сандық модельдеудің міндеті ластаушы заттардың массатасымалдауын моделдеуден тұрады. Әзірленген модель Су ресурстарын қорғау және ұтымды пайдалану проблемаларын шешу үшін Балқаш мыс кен орындарының кен өндіруші кен орындарында практикалық қолданылуы мүмкін.

## АННОТАЦИЯ

Строительство и эксплуатация горнодобывающих предприятий могут привести к нарушению гидрохимического режима подземных вод в связи с образованием куполов растекания техногенных вод под хвостохранилищами. В этих условиях возможно постепенное замещение природных подземных вод техногенными стоками и ухудшение их качества. В связи с этим возникает необходимость повышения уровня производственного и экологического контроля изменения качества окружающей среды. Одним из вариантов улучшения мер технического контроля над состоянием гидросферы в пределах изучаемого участка, является применение программного обеспечения компьютерного моделирования подземных вод на примере Visual MODFLOW Flex.

Целью настоящей магистерской диссертации является построение численной модели для прогноза изменения гидрогеологических условий участка работ, и программная симуляция изменения химического состава и минерализации подземных вод за счет влияния хвостохранилища Сульфидной фабрики Актогайского горно-обогатительного комбината.

Задача численного моделирования заключается в моделировании массопереноса загрязняющих веществ. Разработанная модель может иметь практическое применение на горнодобывающих предприятиях Балхашского пояса медных месторождений для решения проблем защиты и рационального использования водных ресурсов.

## **ABSTRACT**

The construction and operation of mining enterprises can lead to the disturbance of the hydrochemical regime of the underground waters in connection with the formation of domes of spreading of the technogenic water under the tailings. In these circumstances, it is possible a gradual replacement of natural groundwater man-made drains and the deterioration of their quality. In this regard, there is a need to improve the level of production and environmental control of environmental quality changes. One of the options for improving the measures of technical control over the state of the hydrosphere within the study area is the use of software for computer modeling of groundwater on the example of Visual MODFLOW Flex.

The purpose of this master's thesis is to build a numerical model to predict changes in the hydrogeological conditions of the site and program simulation of changes in the chemical composition and mineralization of groundwater due to the influence of the tailings Sulfide factory Aktogay mining and processing plant.

The task of numerical simulation is to simulate the mass transfer of pollutants. The developed model can have practical application in the mining fields of the Balkhash belt of copper deposits to solve the problems of protection and rational use of water resources.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	8
1	Общие сведения о районе работ	10
	1.1 Административное и географическое положение	10
	1.2 Климат	11
	1.3 Гидрография	12
	1.4 Орография	13
2	Геологическое строение и гидрогеологические условия месторождения Актогай	14
	2.1 Геологическое строение	14
	2.2 Гидрогеологические условия	16
3	Характеристики хвостохранилища Сульфидной фабрики	22
	3.1 Параметры и свойства хвостов	23
	3.2 Гидрогеологические условия участка хвостохранилища	27
	3.3 Специализированная мониторинговая сеть для изучения влияния эксплуатации хвостохранилища на окружающую среду	34
	3.4 Результаты мониторинга за состоянием подземных вод в зоне влияния хвостохранилища	35
4	Математическое моделирование массопереноса загрязняющих веществ из хвостохранилища в подземные воды	38
	4.1 Обзор программного обеспечения Visual MODFLOW Flex	39
	4.2 Моделирование движения подземных вод и переноса загрязняющих веществ	41
	Заключение	57
	Список использованной литературы	58
	Приложение А	60
	Приложение Б	62
	Приложение В	64

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменения геологической среды под влиянием техногенеза является наиболее актуальной для осваиваемых территорий. Под воздействием инженерных сетей и сооружений различного назначения происходит существенная перестройка природных связей, которая в промышленных центрах может приводить к необратимым последствиям [1].

Методы производственного экологического мониторинга подземных вод в настоящее время быстро развиваются, в том числе методы изучения процессов фильтрации в водоносные пласты жидких отходов химической, нефтяной и горно-обогатительной отраслей промышленности. Особенно актуальным направлением изучения данных процессов является контроль и изучение степени воздействия на подземную гидросферу гидротехнических сооружений. Построение математических моделей позволяет в свою очередь давать количественную оценку загрязненной зоны и прогнозировать формирования области загрязнения в пределах изучаемого участка.

Цель работы. Изучение влияния эксплуатации хвостохранилища Сульфидной фабрики Актогайского ГОКа на химический состав и минерализацию подземных вод с построением модели массопереноса загрязняющих веществ на базе Visual Modflow Flex.

В соответствии с целью работы ставятся следующие задачи работы:

- 1) Определить эффективность существующего противofiltrационного экрана хвостохранилища,
- 2) На основе имеющихся литературных, проектных и экспериментальных данных выявить основные фильтрационные и гидрохимические процессы, происходящие при отведении хвостов обогащения,
- 3) Продемонстрировать возможности методов математического моделирования для проведения производственного экологического контроля.

Результаты моделирования процессов массопереноса загрязняющих веществ позволит решать проблемы защиты подземных вод в районе действия хвостохранилища Актогайского ГОКа. Кроме того, результаты моделирования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации хвостохранилищ горнодобывающих предприятий расположенных в аналогичных условиях.

Научная новизна магистерской диссертации состоит в следующем: решена миграционная задача методами численного моделирования с использованием модуля MT3DMS на базе MODFLOW, позволяющей моделировать конвективный перенос, дисперсию и химические реакции веществ в потоке подземных вод. Миграционная модель построена на основе фильтрационной модели потока с добавлением параметров переноса на основе экспериментальных данных и граничных условий.

Актуальность работы определяется возможностью использования результатов магистерской диссертации для создания систем поддержки принятия решений в области контроля и прогноза качества подземных вод.

В качестве основной теоретической базой для диссертационной работы использовалась работа В.А. Мироненко, В.Г. Румынина «Проблемы гидрогеоэкологии. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов», Москва, 2002 г.

В качестве методологической основы использована Инструкция гидрогеологического моделирования для оценки воздействия мероприятий по освоению природных ресурсов (Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities, British Columbia, Ministry of Environment, Canada, 2012).

Практической базой диссертационной работы являются собранные в рамках научно-исследовательской работы материалы проведенных ранее гидрогеологических и инженерно-геологических исследований изучаемой территории.

Необходимость выполнения магистерской диссертации обоснована необходимостью определить эффективность использования математических моделей при описании основных процессов миграции загрязняющих веществ и изменении минерализации подземных вод на участках размещения хвостов обогащения добывающей отрасли.

## 1 Общие сведения о районе работ

### 1.1 Административное и географическое положение

Молибден-меднопорфировое месторождение Актогай по административному делению находится на площади Аягозского района Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан, в соответствии с рисунком 1.1.

Месторождение находится в благоприятном регионе с точки зрения географического расположения и экономических условий неподалеку от транспортных и энергетических коммуникаций.

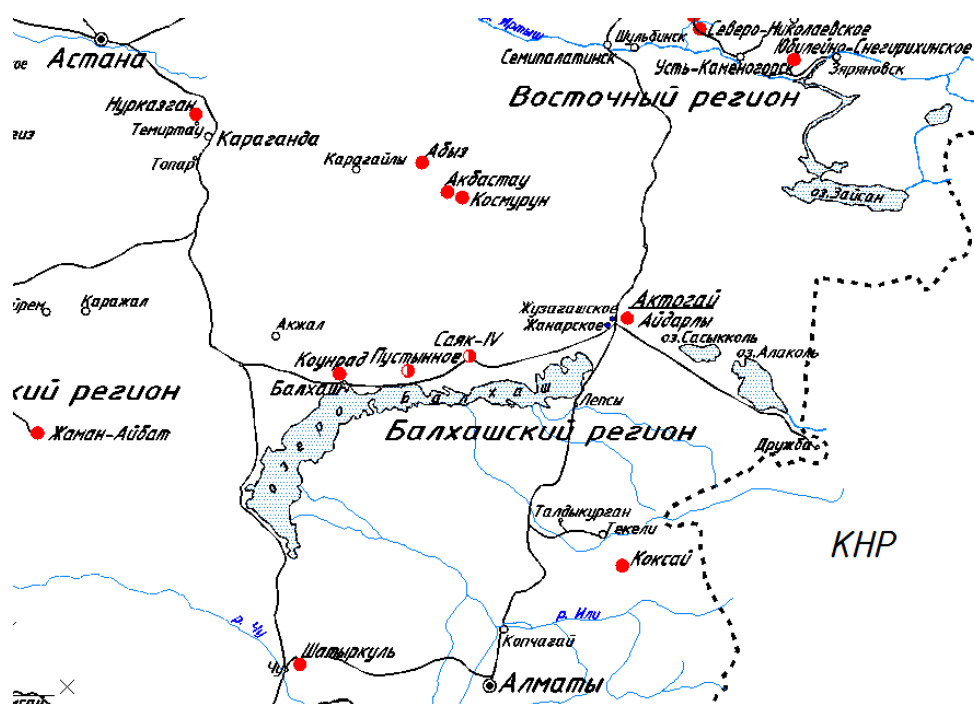


Рисунок 1.1 – Схема расположения месторождения Актогай.

Месторождение Актогай находится в 25 км к востоку от железнодорожной станции Актогай, с которой оно связано автомобильной дорогой. Станция Актогай по асфальтированной дороге II класса имеет выход (86 км) на автодорогу Алматы – Усть-Каменогорск.

Железная и автодорога Актогай-Саяк обеспечивают прямую связь с БГМК, расстояние до г. Балхаша по которым составляет 420 км. От станции Актогай идет железнодорожная ветка на станцию Достык на границе с Китаем.

Численность населения поселка Актогай приблизительно 7000 человек. Районный центр Аягоз с численностью населения приблизительно 37000 человек расположен в 150 км к северо-востоку.

Актогай обладает хорошо развитой местной транспортной инфраструктурой. Участок Актогай соединен служебной железнодорожной веткой, построенной компанией Казахмыс, с железнодорожным узлом в поселке Актогай.

Месторождение Актогай расположено в сейсмической зоне, недалеко от которой происходили землетрясения. Рассматриваемый район проектирования сейсмически слабоактивен согласно СНиП РК 2.03-30-2006 «Строительство в сейсмических районах», возможны землетрясения до 6 баллов.

Сельское хозяйство практически не развито.

В 150 км к юго-востоку имеются месторождения бентонитовых глин среднего качества. Разведанные месторождения лессовидных суглинков, пригодных для производства кирпича, известняков, пригодных для выжигания извести, цементного и сахарного производства известны в 180 км к юго-востоку от месторождения, у ст. Коктума.

Топливо-сырьевые ресурсы района ограничены. В 1956-1967 гг. вблизи государственной границы у ст. Жаланашколь разведано Алакульское месторождение каменного угля с запасами по кат. А+В+С1 – 44,6 млн. т, в т.ч. пригодных для открытой разработки – 7,6 млн.т. Район малонаселен, трудовые ресурсы для вовлечения в горнорудную промышленность ограничены.

Для решения вопроса хозяйственно-питьевого водоснабжения открыто и разведано в 1976-79 гг. Жузагашское месторождение подземных вод, находящееся в 30 км к западу от Актогайского месторождения в долине р. Аягоз. Запасы этого месторождения в количестве 70 тыс.м<sup>3</sup>/сут. по категории В утверждены протоколом ГКЗ РК от 26 сентября 2016 года № 1703-16-У.

В 6 км к западу от месторождения имеется действующий карьер щебня и бутового камня - Каменный.

Действующая ЛЭП Аягоз-Актогай построена по ТУ ЛЭП-110 кв. До базы со станции Актогай построена ЛЭП 10 кв.

## **1.2 Климат**

Согласно СНиП РК 2.04-01-2010, карте климатического районирования и карте зон влажности, район относится к III-А району с сухой зоной влажности.

Средняя относительная влажность проявляется в виде годового цикла, с самой низкой средней относительной влажностью в летние месяцы и с самой высокой в зимние. Относительная влажность колеблется между 50 и 100 процентами в январе, тогда как в июне она варьируется в пределах 16 – 85 процентов.

В Восточном Казахстане преобладает континентальный сухой климат с сильными ветрами, высокой интенсивностью испарения и сравнительно



небольшим количеством осадков. На температуру воздуха летом влияют сухие горячие ветра, дующие из пустынь Средней Азии. На температуру зимой влияют холодные потоки воздуха, приходящие с Северного Ледовитого океана, что может продолжаться до пяти месяцев. Январь - самый холодный месяц, когда средняя температура может колебаться от  $8^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$ . Июль - самый жаркий месяц со средней температурой от  $15^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ . Экстремальные температуры, зарегистрированные в этом районе: минимальная  $-41,1^{\circ}\text{C}$  в январе и максимальная  $+42,4^{\circ}\text{C}$  в августе. Небольшие контрасты дневных температур масс воздуха приводят к ясной погоде и незначительной облачности.

Среднегодовой уровень выпадения осадков в этом районе составляет 227 мм. При общем низком среднемесячном выпадении осадков, в летние месяцы ожидается их минимальное увеличение (свыше 20 мм в месяц). Наивысший уровень выпадения осадков ожидается летом и осенью (более 80 мм в месяц). Значительные снегопады можно ожидать с поздней осени до ранней весны (октябрь - март). Самый высокий среднемесячный уровень выпадения снега может достигнуть 18 мм (что соответствует глубине снежного покрова в 72 мм, при отношении твердого снега к мокрому 4:1). Самое большое выпадение мокрого снега - 75 мм (300 мм замерзшего снега) - можно ожидать в конце зимы.

Район месторождения является частью северного обрамления Балхаш-Алакульской депрессии и представляет собой обширную равнину с развитием гряд пологих сопок и мелких соленых озер и такыров между ними.

В регионе преобладает ветреная погода, с основным направлением ветров с юго-запада. Самые сильные ветра приходятся на весенние месяцы (март - май), а самая тихая погода - на зимние месяцы (декабрь - февраль). Сильные ветра приводят зимой к буранам, а в теплое время года к пылевым бурям. Ветры в течении года преобладают северные и северо-восточные, летом бывают южные и юго-западные ветры. Их средняя скорость 3-5 м/с. Сильные ветры со скоростью до 20 м/с возможны в любой из сезонов - летом они вызывают пыльные бури, а зимой метели.

### **1.3 Гидрография**

Гидрографическая сеть района проектирования представлена реками Аягоз, Карасу, Тансык, озёрами Колдар, Кошкар, Ешиге.

Реки в районе проектирования в основном пересыхающие. Их преобладающая ширина в период наибольшего обводнения, совпадающая с весенними месяцами, 10-40 м, глубина 0,5-2,0 м, при скорости течения 0,1-0,7 м/с. Встречаются участки реки Аягоз с подземным течением протяжённостью до 10 км. Озёра Колдар и Ешиге, расположены севернее месторождения, на расстоянии 8 и 4 км, соответственно. Данные озёра маловодные, солёные, берега низкие, пологие, солончаковые. В озеро

Колдар впадает пересыхающая река Тансык. Озеро Кошкар расположено западнее месторождения на расстоянии около 10 км от него, мелкое, солёное, иногда полностью пересыхающее, дно солончаковое. На юго-западе на расстоянии около 40 км по прямой от пос. Актогай расположено озеро Балхаш. Озеро судоходное, глубина озера до 8 м, восточная часть озера солёная. Ближайшая река Аягоз протекает в 30 км к западу от месторождения. На этом участке она не имеет постоянного стока, распадается на отдельные плесы. Более мелкие речки – Ай, Баканас и Тансык также непостоянны и маловодны и не могут служить источником водоснабжения. По долинам рек располагаются сенокосные угодья.

Растительность полупустынная и пустынная, растительный покров разрежённый, состоит из засухоустойчивых многолетних злаков (ковыль и типчак), низкорослых кустарников (полынь, верблюжья колючка, различные виды солянок) и кустарников (боялыч, карагана, тамариск) высотой 1-2 м. По рекам Аягоз и Тансык, по берегам озера Балхаш встречаются высокие камышовые заросли.

#### **1.4 Орография**

Рельеф местности в районе промплощадки мелкосопочный (горы Колдар). Склоны сопки с углами наклона 10-15°, отметки рельефа колеблются от 360 до 470 м. Относительное превышение высот 30-50 м. В зоне будущей промплощадки распространены коренные интрузивные и вулканогенные породы, представленные скальными туфопесчаниками, гранитами, базальтами, порфиритами, конгломератами и другими разностями. Мощность коренных пород измеряется сотнями метров. В верхней части они выветрелые, трещиноватые, с поверхности покрытые чехлом четвертичных отложений - суглинками, дресвяно-щебёнистыми грунтами мощностью около нуля на сопках и порядка 2,0 м на склонах.

## **2 Геологическое строение и гидрогеологические условия месторождения Актогай**

### **2.1 Геологическое строение**

Медно-порфировое месторождение Актогай – крупнейшее в Республике Казахстан по разведанным запасам меди. Месторождение располагается в восточной части вулканического глубинного пояса, в северном Прибалхашье, в центральной части Колдарского интрузивного массива.

Границы Актогайского рудного поля определяются морфологией Колдарского массива, представляющего собой лакколит, состоящий из диорита и гранодиорита. Гранодиоритовые интрузии присутствуют в северо-западном углу участка хвостохранилища (бывший карьер), и в северо-восточном углу (край рудного тела). Остальная часть участка состоит преимущественно из тёмно-серых андезитов, выходящих на поверхность на гребнях возвышенности в западной стороне участка, и ряда андезитового туфа с прослойками слегка метаморфизированного вулканического алеврита и песчаника. С двух сторон месторождения Актогай находятся два сопутствующих медно-порфировых месторождения: Айдарлы – 3 км на запад-северо-запад и Кызылкия – 5 км на восток-северо-восток.

Жильные породы комплекса представлены диоритовыми и диабазовыми порфиритами, кварцевыми и дацитовыми порфирами.

Строение рудного поля обусловлено наличием крупных долгоживущих разрывных нарушений актогайского (субширотного), колдарского (северо-восточного) и северо-западного направлений.

Для рудного поля в целом и участка месторождения характерно блоковое строение, предопределенное разрывными дислокациями. В пределах месторождения выделено 11 сравнительно крупных тектонических блоков: Северо-Западный, Северный, Буровой, Центральный, Диагональный, Восточный, Геофизический, Южный, Юго-Восточный, Дальний, Колдарский.

За исключением Колдарского и Дальнего, все блоки рудоносны или потенциально рудоносны.

Принципиальной особенностью участка месторождения является кольцевой план геологических образований, обусловленный особенностями тектонического строения.

Руды месторождения представляют собой минерализованные гидротермально-измененные граниты и вулканиты, содержащие молибденит-халькопирит-пиритовую, реже – молибденит-борнит-пирит-халькопиритовую минерализацию прожилково-вкрапленного, гнездово-вкрапленного и брекчиевого типов.

Рудный штокверк месторождения Актогай является составной частью обширного ареала сульфидной (преимущественно пиритовой) минерализации, включающего в себя также рудный штокверк месторождения

Айдарлы.

В подсчете запасов выделены два промышленных типа руд: окисленные руды (включая в них и смешанные руды) и сульфидные руды (включая в них руды зоны развития вторичных сульфидов).

Основную промышленную ценность месторождения составляют сульфидные руды. В таблице 2.1 представлен минеральный состав сульфидных руд.

Таблица 2.1 – Минеральный состав сульфидных руд

	Рудные	Нерудные
Главные	Пирит, халькопирит, молибденит, магнетит	Кварц, калишпат (микроклин), серицит, биотит, хлорит, кальцит, десмин, ломантит
Второстепенные	Борнит, халькозин, гематит, сфалерит, галенит, титаномагнетит, рутил, сфен, лейкоксен	Альбит, пренит, эпидот, актинолит, турмалин, мусковит
Редкие и очень редкие	Ковеллин, кубанит, дигенит, тетраэдрит, самородное золото и серебро, электрум, штрмейерит, вольфрамит, шеелит, молибдошеелит, повеллит, виттихенит, карролит, арсенопирит, пентландит, мушкетовит, пирротин, марказит, кобальт-пирит, маккинавит, валлериит, ильменорутит, анатаз	Апатит, ангидрит, сидерит, барит

В геологическом строении на участке залегают современные отложения, представленные глинистыми грунтами (суглинками, супесью), песками различной крупности, а также элювиальные образования, представленные дресвяно-щебенистыми грунтами с суглинистым заполнением и скальным грунтом, включающие породы диорита, гранодиорита, песчаника и известняка. Сверху все перечисленные отложения перекрыты почвенно-растительным слоем.

В геологическом строении месторождения участвуют вулканогенные и интрузивные породы, осложненные серией разломов в основном субширотного направления. Наиболее трещиноватыми являются зоны Малого Колдарского, Бурового и Диагонального разломов, контакты даек с вмещающими гранитоидами. Для месторождения характерно широкое

развитие гидротермально-метасоматических изменений пород, способствующих кольматации трещин.

В структурно-тектоническом отношении месторождение приурочено к узлам сопряжений крупных разломов северо-восточного и северо-западного направлений. В пределах собственно месторождения разломы (Малый Колдарский, Буровой, Диагональный) обусловили сложное блоковое строение рудного штокверка. Малый Колдарский, Буровой, Диагональный и др. разломы сопровождаются зонами смятия и повышенной трещиноватости мощностью 30-40 м, служащими проводниками подземных вод. Актогайский разлом, представленный разрушенными породами с глиной трения, является водонепроницаемым экраном на пути движения подземных вод.

## 2.2 Гидрогеологические условия

Месторождение Актогай расположено в центральной водораздельной части Колдарского гранитоидного массива с абсолютными отметками поверхности 420-455 м.

По схеме гидрогеологического районирования территория месторождения приурочена к Центрально-Казахстанскому гидрогеологическому району. В гидрогеологическом отношении площадь месторождения представляет бассейн подземных вод зоны открытой трещиноватости в жестких палеозойских породах, находящийся в области очагового питания и транзита подземных вод. Гидрогеологическая карта и гидрогеологический разрез участка Актогай представлена в Приложении А.

Удаленность от поверхностных водотоков, малое количество атмосферных осадков (194 мм), наличие местами слабОВОДПРОНИЦАЕМЫХ покровных отложений, кольматации трещин продуктами выветривания и гидротермальных изменений пород обусловили слабую обводненность месторождения и повышенную минерализацию подземных вод. Значительная часть месторождения Актогай на участках выхода коренных пород на отметках местности 580-700 м с поверхности перекрыта проницаемыми, но практически безводными и водонепроницаемыми делювиально-пролювиальными верхнечетвертичными отложениями ( $dpQ_{III}$ ), представленными серовато-желтыми супесями, суглинками и песками с включением щебня. Мощность незначительна в пределах 2 м и не превышает 10-18 м в местах понижения рельефа.

В пределах района и самого месторождения развиты следующие водоносные горизонты и комплексы:

Водоносный горизонт современных аллювиальных отложений ( $aQ_{IV}$ ).

Современные аллювиальные отложения составляют поймы и высокие поймы рек Баканас и Аягоз. Примыкает к горному отводу месторождения Актогай с севера и юга. Водовмещающими являются песчано-гравийные отложения, суглинки с гравием и песком. Подземные воды вскрываются на

глубине 2,6-4,0 м. Дебиты скважин варьируются от 0,06 до 1,09 л/с при понижении уровня на 2,0-0,17 м соответственно.

Подземные воды, как правило, пресные с минерализацией 0,5-1,0 г/л или слабominерализованные (1,2-1,4 г/л). Они широко используются местным населением для питья и сельскохозяйственных нужд. По химсоставу воды в основном гидрокарбонатно-хлоридно-натриевые или реже с содержанием сульфат-ионов.

Питание водоносного горизонта осуществляется за счет фильтрации поверхностных вод, а также дренирования вод аллювиальных отложений высокой террасы. Частичное питание происходит за счет перетекания подземных вод палеозойских пород на участках развития древней долины.

Водоносный горизонт средне-верхнечетвертичных аллювиально-пролювиальных отложений (арQ<sub>II-III</sub>). Это водоносный горизонт распространен и занимает всю центральную часть Актогайской депрессии и примыкает к контуру горного отвода с севера, востока и юга. Отложения водоносного горизонта составляют аллювиально-пролювиальные долины рек Баканас, Аягоз и Таншик. Водовмещающие отложения представлены песчано-гравийными отложениями с линз песчаников и конгломератов.

Слои водоносных отложений не являются одинаковыми, прослеживаются прослойки (0,5-4,0 м) песчано-гравийных отложений с включением пылеватых глинистых частиц.

Мощность песчано-гравийных отложений возрастает в направлении вниз по течению рек, а также в направлении от краев к центру депрессии (50-80 м). Они залегают среди новообразованных глин или палеозойских пород.

Глубина уровня грунтовых вод 1,3-3,0 м. Водоносный горизонт характеризуется избыточной достаточностью для водоснабжения. Дебит скважин изменяется от 5,0 до 9,4 л/с при понижении уровня воды до 14,3-10,6 м соответственно.

Минерализация грунтовых вод разнообразна и колеблется от 0,3 до 4,7 г/л. Воды по составу гидрокарбонатно-сульфатно-натриевые с минерализацией 0,6-0,9 г/л, а в западной части района – до 1,6 г/л. Общая жесткость 1,0-5,0 мг-экв/л. Воды этого горизонта могут быть использованы для водоснабжения.

Подземные воды зоны открытой трещиноватости нерасчлененных верхнекаменноугольных-нижнепермских отложений (С<sub>3</sub>-Р<sub>1</sub>) развиты в юго-восточной части месторождения за Южно-Колдарским разломом.

Водовмещающими породами являются алевриты, песчаники, туфопесчаники, туфы липаритового и трахилипаритового состава. Наиболее обводненная часть разреза установлена в интервале 18-66 м. Глубина залегания уровня подземных вод составляет 17,8 м.

По химическому составу воды сульфатные натриевые с минерализацией 5 г/л.

Подземные воды зоны открытой трещиноватости каменноугольных отложений (С) характеризуются данными опробования 20 скважин,

пройденных в контуре. Подземные воды в зависимости от отметок дневной поверхности на глубинах 5,3-13,7 м. Глубина развития зоны обводненной трещиноватости по данным расходометрических исследований скважин колеблется от 40 до 158 м.

Дебиты скважин, в силу неравномерной трещиноватости пород, изменяются от 0,01 до 2,0 л/с при понижениях уровня воды соответственно на 35,0-18,9 м. Удельные дебиты скважин колеблются от тысячных до 0,12 л/с. Наиболее обводненными являются зоны сочленения Малого Колдарского разлома с Диагональными и Актогайскими разломами.

Подземные воды открытой трещиноватости разновозрастных интрузивных пород кислого и среднего состава занимают большую часть площади месторождения Актогай. Водовмещающие породы представлены гранодиоритами, гранодиорит-порфирами, диоритами и габбро-диоритами, слагающими наиболее возвышенные, водораздельные участки. Процессы физического выветривания в совокупности с тектоническими подвижками способствовали образованию различных трещин, глубина распространения которых составляют 60-90 м, а в зонах разломов – до 270 м. Мощность обводненной зоны составляет, в среднем, 50-80 м, а максимальная – 270 м.

Пробными откачками было опробовано 57 скважин глубиной 80-600 м. Уровни подземных вод в скважинах изменялись от 5,3 до 15,97 м. Дебиты при откачках колебались от 0,01 до 2,0 л/с при понижении уровня на 7,1-78,2 м, удельные дебиты в пределах 0,0002-0,17 л/с·м, коэффициенты фильтрации 0,001-0,42 м/сутки.

Минерализация и химический состав подземных вод месторождения формируются под воздействием сложных процессов: физико-химических, биологических, испарительной концентрации и в результате вторичной аккумуляции солей в породах и водах, сезонного выщелачивания сульфидов в условиях скудного питания.

Подземные воды месторождения имеют пеструю минерализацию от 1,2 до 9,4 г/л. Для подземных вод с минерализацией 1-3 г/л, распространенных в юго-восточной части месторождения, характерен сульфатно-хлоридный натриевый состав с преобладанием сульфатного аниона. Содержание сульфат-иона колеблется от 514 до 1500 мг/л, хлор-иона - от 142 до 773 мг/л, гидрокарбонат-иона – от 67 до 317 мг/л.

Среднеминерализованные подземные воды с минерализацией 3-5 г/л получили распространение на значительной площади месторождения (за исключением северо-западной и юго-восточной частей). По химическому составу они сульфатно-хлоридные натриевые. В анионном составе преобладают сульфат-хлор-ион, в катионном натрий-ион. Максимальное значение сульфат-иона достигает 2691 мг/л, хлор-иона – 762. Содержание гидрокарбонат-иона не превышает 220 мг/л.

Химический состав подземных вод месторождения формируется в условиях относительно замедленного продвижения потока, незначительного инфильтрационного питания и более длительного соприкосновения и

взаимодействия системы порода-вода (рисунок 2.1). Вследствие значительного залегания уровня подземных вод (5-10 м) процессы испарительной концентрации получили слабое развитие. Значительное влияние на химический состав подземных вод оказывает состав воднорастворимых компонентов в зоне аэрации.

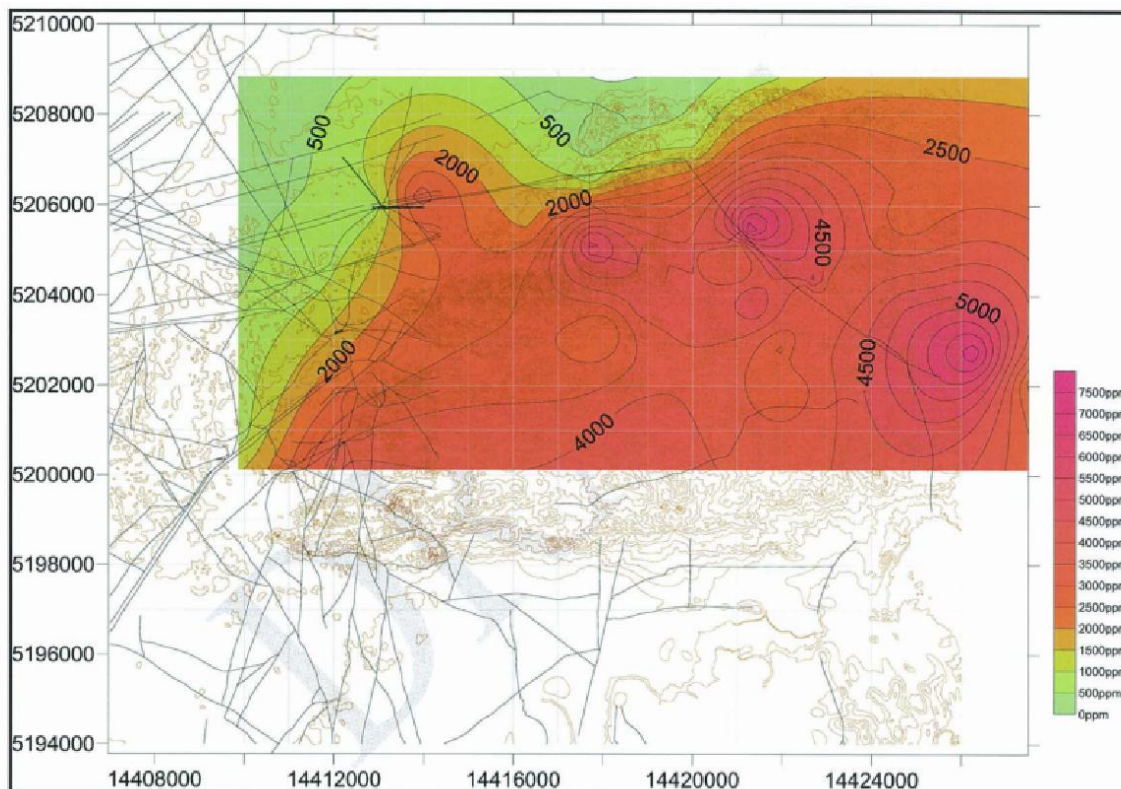


Рисунок 2.1 – Региональные контуры солености подземных вод

Подземные воды месторождения жесткие и очень жесткие. В подземных водах с минерализацией 1-3 г/л величина общей жесткости составляет - 4,2-19 мг-экв/л, а в подземных водах с минерализацией 3-10 г/л - 17-29 мг-экв/л. Имея карбонатную жесткость 1,7-4,1 мг-экв/л, они обладают углекислой агрессивностью по отношению к бетону. Повышенное содержание сульфат-иона (514-3168 мг/л) вызывает сульфатную агрессивность вод и требует при производстве работ применения сульфатостойких цементов. В целом подземные воды обладают нейтральной реакцией (рН 6,8-7,4) за счет повышенного содержания гидроокислов железа в зоне окисления.

Формирование подземных вод на месторождении Актогай определяется взаимодействием нескольких факторов, основными из которых являются: климатические условия, характер рельефа местности, рыхлый покров, литологический состав водовмещающих пород и наличие тектонических нарушений.

Подземные воды на месторождении формируются, в основном, за счет инфильтрации атмосферных осадков, преимущественно, зимне-весенних. В



связи с тем, участок месторождения является приподнятым относительно местного базиса эрозии, но перекрыт сверху слабопроницаемыми суглинками, талые воды растекаются в различные стороны, не играя существенной роли в питании подземных вод.

Уровенный режим подземных вод в районе месторождения Актогай характеризуется интенсивным весенним подъемом, связанным со снеготаянием и весенними дождями. Инфильтрация атмосферных осадков происходит в основном на вершинах и возвышенностях, сложенных устойчивыми к выветриванию палеозойскими породами. Подъем уровня начинается в марте, апреле, затем до осени идет плавный спад уровня, связанный с расходом воды на подземный сток, испарение и транспирацию. Минимум уровня отмечается в период прекращения питания подземных вод: в декабре-феврале. Амплитуда колебания уровня, в зависимости от условий питания и мощности зоны аэрации, изменяется от 0,24 до 3,90 м. В скважинах с глубоким залеганием уровня (более 20 м) подземных вод режим характеризуется слабой связью с дневной поверхностью.

Второй, значительно меньший по величине, подъем уровня отмечается осенью, когда вследствие резкого уменьшения испарения несколько увеличивается питание подземных вод.

Относительно слабое развитие трещиноватости пород и их малая мощность способствовали формированию потока трещинных вод с короткими путями фильтрации, иногда обособленных местными поверхностными водоразделами. Областями их разгрузки служат отрицательные формы рельефа – лога и суходолы. Основную расходную статью водного баланса составляют испарение, подземный сток в прилегающие равнины, в меньшей степени – транспирация растениями. Значительная часть атмосферных осадков расходуется на смачивание пород зоны аэрации и внутригодовое испарение.

При средних суммарных годовых осадках 194 мм количество инфильтрационного питания достигает в среднем 6,1 мм, а остальная часть расходуется на испарение и транспирацию растениями. Модуль подземного стока, определенный по данным расчленения уровенного режима подземных вод, варьируется от 0,03 до 0,30, в среднем 0,29 л/с с 1 км<sup>2</sup>. Величина коэффициента фильтрации для разновозрастных интрузивных пород составляет 0,04-0,10, для нерасчлененных вулканитов – несколько ниже – 0,02-0,06. Средняя его величина по месторождению равна 0,03.

В целом условия формирования подземных вод месторождения неблагоприятны из-за аридности климата, наличия покрова делювиально-пролювиальных суглинков, затрудняющих инфильтрацию атмосферных осадков. Скудность питания подземных вод и кольматация пород продуктами гидротермальных изменений обусловили слабую обводненность месторождения и повышенную минерализацию подземных вод.

Подземные воды месторождения безнапорные. Наиболее водообильная часть разреза месторождения находится на глубине до 90 м. В остальной части разреза массива наблюдаются отдельные неравномерно распределенные трещины в основном с низкодебитными водопритоками до 0,1 л/с. Нижняя граница зоны обводненной трещиноватости, по результатам расходомерии, прослеживается до глубины 220 м.

Таким образом, гидродинамическая схема месторождения складывается следующим образом. По условиям залегания на самом месторождении выделяются преимущественно подземные воды каменноугольных и разновозрастных интрузивных пород. По фильтрационным свойствам водовмещающих пород, по условиям формирования, распространения и разгрузки перечисленные выше водоносные горизонты являются единой системой и поэтому представляют собой единый водоносный комплекс или неограниченный пласт. Вследствие наложения процессов физического выветривания пород на региональную трещиноватость вся толща пород в разрезе представляет собой двухслойный фильтрационный массив с повышенными емкостными свойствами в верхнем 100-метровом слое. Коэффициент фильтрации для этого слоя, принятый по данным двух опытных кустовых откачек и водоотлива из шурфа 1, составляет 0,17 м/сутки. Мощность подземного потока, установленная по данным расходомерии, составляет 80 м. Ниже 100 м коэффициент фильтрации уменьшается до 0,016 м/сутки.

### **3 Характеристика хвостохранилища Сульфидной фабрики**

На молибден-меднопорфировом месторождении Актогай предусматривается добыча окисленных и сульфидных руд с их переработкой на промплощадке Актогайского ГОКа. Из окисленных руд методом кучного выщелачивания производится катодная медь в количестве до 25 тыс.т в год в местном электролизном цехе. Сульфидная руда в количестве 25 млн.т/год перерабатывается на обогатительной сульфидной фабрике. Медный (около 311 тыс.т/год) и молибденовый (около 3,6 тыс.т/год) концентраты отправляются потребителям железнодорожным транспортом.

Хвостохранилище предназначено для складирования хвостов флотации обогатительной фабрики рудника Актогай. Хвосты флотации являются техногенным сырьем, в дальнейшем возможна их переработка. Количество технологических хвостов составляет - 24685,122 тыс. тонн в год.

Хвостохранилище расположено на естественном профиле участка к югу от обогатительной фабрики, и постепенно расширяется в направлении с востока на запад. Вместимость хвостохранилища рассчитана на весь срок эксплуатации предприятия. Хвостохранилище, в конечном итоге, займёт территорию приблизительно в 4500 гектар.

Хвосты будут храниться в ряде низких конических отвалов со слегка вогнутым склоном. Средний уклон в 1,77 процентов основан на принятом расчётном значении для нижнего слива сгустителя (концентрация твёрдых частиц сброса хвостов) в 68 процентов твёрдых частиц из сгустителя высокого давления.

Как показано на рисунке 3.1, сооружения хвостового хозяйства состоят из следующих объектов:

- ramпы трубопровода хвостов;
- системы распределения хвостов;
- насыпи и валы;
- системы сливной воды;
- подъездной дороги к системе сливной воды;
- водосборной дрены естественного стока.

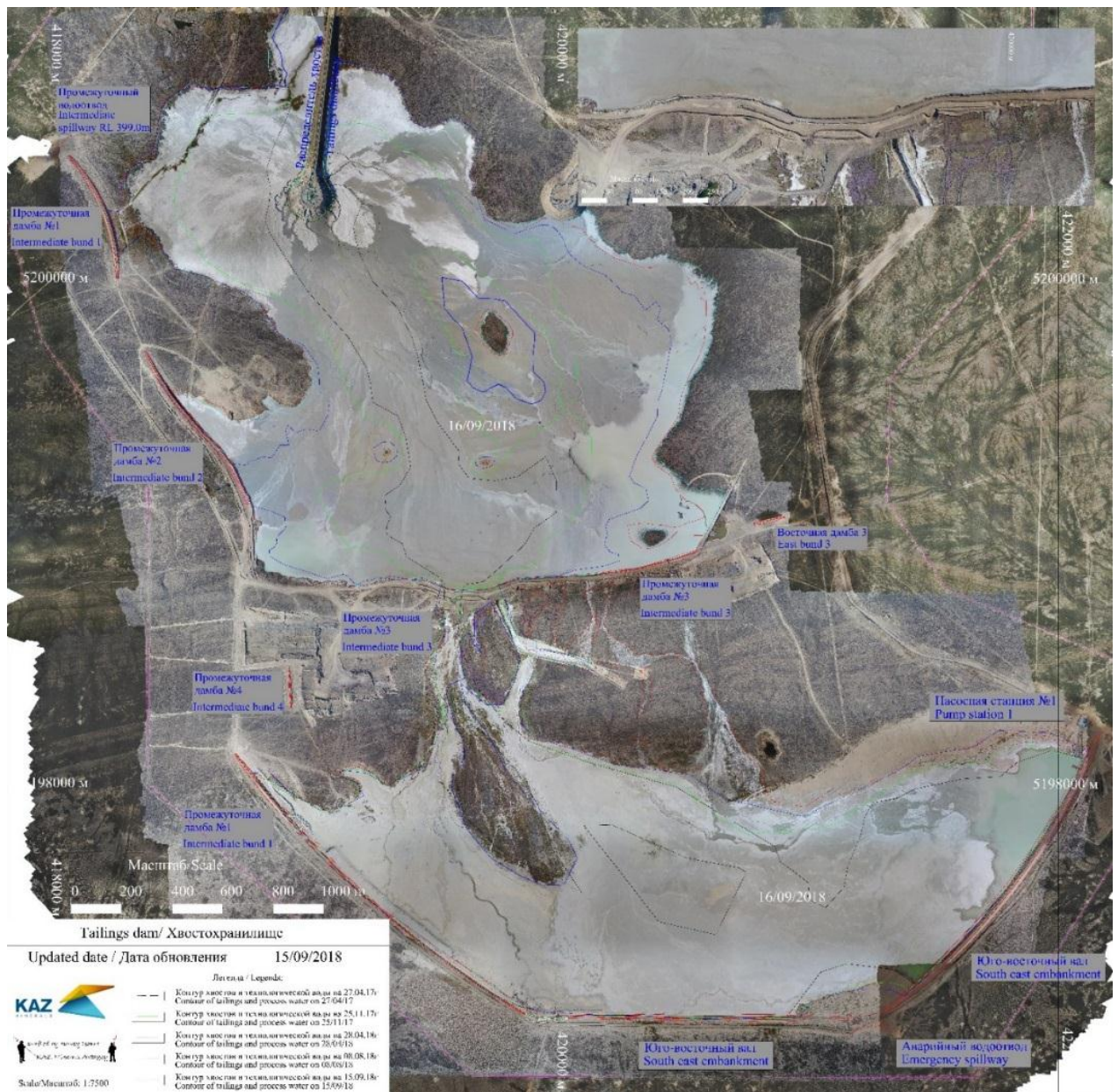


Рисунок 3.1 – Хвостохранилище Сульфидной фабрики по состоянию на 15.09.2018

Концентрация твёрдых частиц нижнего слива составляет от 69 процентов до 71 процентов, однако, включая коэффициент надёжности, концентрация твёрдых частиц нижнего слива сгустителя составит 68 процентов. Целью сгущения является сохранение технической воды и максимизация наклонов берега и местной плотности по разумной стоимости.

### 3.1 Параметры и свойства хвостов

Производительность добычи и выработки хвостов для проекта Актогай приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Производительность добычи и выработки хвостов

Данные по добыче	
Тип добычи:	Открытый медный карьер
Срок эксплуатации месторождения:	58 лет
Параметры выработки хвостов:	
Средний объем выработки:	25 млн. тонн в год
Общее количество:	1400 млн. тонн

Свойства хвостов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Свойства хвостов

Классификация хвостов	Показатель
Плотность частиц хвостов	2.68
Предел текучести	19
Предел пластичности	16
Показатель пластичности	3
Гранулометрический состав:	
D(80) (микрон)	180
D(50) (микрон)	70
D(20) (микрон)	9

Принятые расчётные значения плотности хвостов:

- содержание твёрдых частиц в сбросе (процентов)- 68
- осадочная плотность (плотность в сухом состоянии) (т/м<sup>3</sup>) - 1,35
- плотность предела усадки (т/м<sup>3</sup>) - 1,63
- расчётная плотность в сухом состоянии (т/м<sup>3</sup>) - 1,60

Было произведено несколько геохимических испытаний твёрдых частиц хвостов. Испытания включают в себя:

- содержание и образование серы;
- содержание и образование углерода;
- показатель нейтрализующей способности карбоната;
- кислотно-нейтрализующая способность;
- максимальная потенциальная кислотность;
- конечный потенциал кислотообразования;
- удельное кислотообразование;
- кривая характеристики кислотного буфера;

- многоэлементный анализ твёрдых частиц, оценка образования кислых стоков твёрдых частиц хвостов.

Результаты статического испытания подтвердили, что образец хвостов основной/контрольной флотации не образовывал кислоту. Содержание серы в хвостах было незначительным в 0,02 процентов, что соответствует незначительной кислотно-нейтрализующей способности, хвосты можно рассматривать как фактически нейтрализующими с фактической способностью кислотообразования - 20 кг H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/т.

Содержание молибдена в хвостах приблизительно в 20 раз больше, чем обычно возникает в фоновых грунтах, а также выявлено незначительное обогащение твёрдых частиц хвостов медью, хромом, никелем и селеном. В остальной части представленные образцы хвостов, в целом, не содержали металлов и не были обогащены металлоидами, что обычно считается более важным с точки зрения экологии, включая мышьяк, кадмий, кобальт, свинец, ртуть, олово и цинк, которые возникают с концентрацией типичной для фонового грунта.

Химический состав пробы хвостов флотации обогатительной фабрики Актогайского ГОКа определен по данным оценки геохимических характеристик и способности к формированию кислот в хвостах, прошедших первичную перемешивающую флотацию и представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Химический состав пробы хвостов флотации Актогайского ГОКа

Наименование элемента	Единица измерения	Содержание в хвостах
Аллюминий	%	0,1
Мышьяк	мг/кг	5
Барий	мг/кг	820
Бериллий	мг/кг	1,1
Висмут	мг/кг	0,1
Кальций	%	0,02
Кадмий	мг/кг	0,06
Кобальт	мг/кг	9
Хром	мг/кг	312
Медь	мг/кг	269
Железо	%	0,02
Галлий	мг/кг	17
Ртуть	мг/кг	0,02
Калий	%	0,03
Магний	%	0,01
Марганец	мг/кг	326
Молибден	мг/кг	44

Продолжение таблицы 3.3

Натрий	%	0,0
Никель	мг/кг	211
Фосфор	мг/кг	910
Свинец	мг/кг	12
Сера	мг/кг	0,02
Сурьма	%	0,3
Селен	мг/кг	2
Олово	мг/кг	2
Стронций	мг/кг	358
Торий	мг/кг	4
Титан	мг/кг	0,003
Уран	%	1
Ванадий	мг/кг	75
Цинк	мг/кг	38

Проектируемый объем хвостохранилища создается путем устройства ограждающей плотины из вторичных дамб обвалования, устраиваемых на уплотненном основании из хвостов.

Отвальные хвосты складироваться на проектируемом хвостохранилище в сгущенном виде. Это способствует укреплению дамбы обвалования частицами складированных хвостов и позволяет практически свести к нулю возможность ее разрушения и прорыва.

Исходя из общей массы хвостов в 1400 млн. тонн и общей плотности в сухом состоянии, равной 1,6 т/м<sup>3</sup>, общий необходимый объем хвостохранилища составляет около 875 млн.м<sup>3</sup>. На основании вышеуказанного, необходимый объем хвостохранилища в разные годы эксплуатации рудника представлен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Объем хвостохранилища

Год	Суммарная общая масса хвостов (млн./т)	Суммарный необходимый объем хвостохранилища (млн.м <sup>3</sup> )
5	125	78
10	250	156
15	375	234
20	500	313
25	625	391
30	750	469
35	875	547
40	1,000	625
58	1,400	875

В настоящее время предусматривается реализация 1 этапа строительства.

Хвостохранилище на данном этапе будет пригодным для размещения хвостов с момента запуска 16 декабря 2016 года до 2022 года, в момент переполнения южного промежуточного вала 1.

На первом этапе строительства построены следующие объекты:

- центральная промежуточная насыпь и связанный с ней водослив;
- центральный промежуточный вал;
- центральный промежуточный вал;
- центральный промежуточный вал;
- восточный вал;
- юго-восточная насыпь и связанный с ней водослив;
- рампа трубопровода хвостов,
- насосная станция сливной воды, подъездная дорога и трубопровод;
- северо-восточная водосборная дрена.

### 3.2 Гидрогеологические условия участка хвостохранилища

До начала эксплуатации хвостохранилища были осуществлены гидрогеологические полевые исследования с целью определения глубины залегания грунтовых вод, региональных потоков подземных вод и качества подземных вод в непосредственной близости от предполагаемого рудника.

По результатам данной работы было установлено качество региональных грунтовых вод. Выявлено, что существует сильная корреляция между литологией пород и соленостью или минерализацией грунтовых вод. Грунтовые воды в холмистой террасовой местности, залегающие под



магматическими гранодиоритами и вулканическими туфами, имеют очень высокую соленость. Воды лучшего качества можно обнаружить, как правило, в песчаных первичных водоносных горизонтах в долине. В некоторых районах это высокое соотношение солености простирается в долины, покрытые четвертичными отложениями малой мощности, которые залегают под туфами.

Среднее значение рН для этой территории составляет 7,9, выявленное в щелочной среде. Среднее значение рН на территории горных работ составляет 7,4, а среднее значение в четвертичных отложениях в долине составляет 8,1. Самое высокое значение рН обнаружено в южной части рудного тела, где значение рН составило 10,1. Самое низкое значение рН обнаружено в северной части рудного тела, где значение рН составило 5,8.

В общем, измерения рН показывают высокую кислотную среду, формирующуюся вокруг медно-сульфидных порфировых месторождений. Там, где это не происходит, обычно означает, что анаэробные условия развиваются в неизменной среде. Эта среда дает возможность анаэробным бактериям размножаться и разнообразить гидрохимическую среду развиваясь на короткие расстояния. Во время отбора проб при откачке в 2008 году на исследование гидрогеологических характеристик было обнаружено присутствие сероводорода (по запаху) в некоторых скважинах, указывающих, что осуществляется бактериологическая активность. Отсутствие свободного кислорода может стать результатом окислительно-восстановительных реакций, при реакции с медью (или другими металлами) обычно является восстановителем. Низкие температуры, высокий уровень грунтовых вод и прошедший период замерзания-оттаивания (или оледенения) может также играть определенную роль в ограничении кислотной реакции в анаэробной среде. В конечном счете, это чаще приводит к формированию кальций сульфатов, чем к кислоте, и это наблюдалось в виде появления белой соли на поверхности земли.

Альтернативные химические реакции могут происходить там, где существуют карбонаты во вмещающей породе. А этих условиях, серная кислота реагирует с карбонатом, что приводит к образованию сульфата кальция. Эта щелочь при нейтральной среде сокращает миграцию и растворимость медной руды и приводит к более низким, чем ожидалось, показателям меди в грунтовых водах. Следует отметить, что среднее значение рН на и в вокруг участка горных работ, хотя и по-прежнему щелочное, является ниже того, что было выявлено на ближайших территориях. Это может быть признаков происходящей буферизации. Так как химия кислотного дренажа рудника является сложным биогеохимическим процессом, она выходит за рамки настоящего отчета для последующего изучения.

В рамках программы исследования грунтов на участке хвостохранилища были произведены инженерно-гидрогеологические исследования с июля по сентябрь 2012 года. Подземные воды района имеют

пеструю минерализацию от 1,2 до 9,4 г/л. По химическому составу воды сульфатные натриевые с минерализацией до 5 г/л. Для подземных вод с минерализацией 1-3 г/л, распространенных в юго-восточной части месторождения, характерен сульфатно-хлоридный натриевый состав с преобладанием сульфатного аниона. Содержание сульфат-иона колеблется от 514 до 1500 мг/л, хлор-иона -от 142 до 773 мг/л, гидрокарбонат-иона – от 67 до 317 мг/л.

В рамках проектирования хвостохранилища месторождения Актогай проведены испытания на проницаемость хвостов, уложенных в хвостохранилище. Согласно проведенным исследованиям коэффициент проницаемости составляет 0,008 м/сутки.

Планировка ложа хвостохранилища предусматривало снятие почвенно-растительного плодородного и потенциально-плодородного слоев почвы с перемещением во временный отвал. В южной части внутри хвостохранилища в естественном понижении рельефа сформирован аккумулирующий пруд неподалеку от юго-восточной насыпи для сбора отработанной воды и атмосферных осадков (оборотной воды). Аккумулирующий пруд выполняется в естественном понижении рельефа. В качестве гидроизоляции пруда проектом предусматривается грунтовый противofiltrационный экран по основанию из водоупорного глинистого грунта (суглинка) с коэффициентом фильтрации менее 0,001 м/сутки. Толщина противofiltrационного экрана составляет 0,5 м. В качестве защитного слоя поверх грунтового противofiltrационного экрана по всей площади предусмотрено крепление из щебня толщиной 0,2 м.

Вместе с тем были проведены испытания на проницаемость грунтов на территории месторождения. Согласно проведенным исследованиям грунтов на территории хвостохранилища коэффициент фильтрации составляет от 0,01 до 0,007 м/сутки.

Для определения водопроницаемости массива скальных пород участка хвостохранилища и расчета коэффициента фильтрации были проведены полевые опытно-фильтрационные исследования: опытные нагнетания в скважины с применением тампон-пакерного устройства. По результатам опытных исследований на участке хвостохранилища принимается: коэффициент фильтрации 0,0102 м/сутки. Согласно ГОСТ РК 25100-2011 грунты по водопроницаемости характеризуются также как слабоводопроницаемые.

В зоне влияния хвостохранилища действующие крупные и локальные хозпитьевые водозаборы в радиусе 25 км отсутствуют. Химический состав подземных вод рассматриваемого участка формируется в условиях относительно замедленного продвижения потока, незначительного инфильтрационного питания и более длительного соприкосновения и взаимодействия системы порода - вода. Вследствие значительного залегания уровня подземных вод (5-10 м) процессы испарительной концентрации получили слабое развитие. Значительное влияние на химический состав

подземных вод оказывает состав воднорастворимых компонентов в зоне аэрации. По данным водной вытяжки грунтов из шурфов засоленность почво-грунтов увеличивается с глубиной от 1,33 до 3,92 процентов на 100г абсолютно сухой пробы. Тип засоленности сульфатно-кальциевый натриевый. Содержание хлора не превышает 7,1 процентво. Подземные воды на участке месторождения местные и очень жесткие. В подземных водах с минерализацией 1-3 г/л величина общей местности составляет -4,2-19 мг-экв/л, а в подземных водах с минерализацией 3-10 г/л - 17-29 мг-экв/л. Имея карбонатную жесткость 1,7-4,1 мг-экв/л, они обладают углекислой агрессией по отношению к бетону. Повышенное содержание сульфат-иона (514-3168 мг/л) вызывает сульфатную агрессивность вод.

В гидрогеологическом отношении область хвостохранилища представляет собой бассейн подземных вод, зоны открытой трещиноватости вулканогенных и интрузивных пород, находящийся в области очагового питания и транзита подземных вод. Описание области питания бассейнов водосбора по проекту приведено ниже. Это описание основано на анализе спутниковых снимков, характеристики ливневых осадков, отчетов по состоянию грунтовых вод и топографического контура. Определенные допущения (например, общий тип почвы, скорость инфильтрации, ширина дренажных линий и т.д.).

Как описано выше, область разработки находится на высотном плато, которое само по себе служит водоразделом. Для того, чтобы очертить окружающие границы водосбора четвертичного периода, были подготовлены топографические карты, как показано на Рисунке 3.2. На расстоянии 100 км от области разработки нет четко определенных границ водосбора.

Поэтому ближайшей границей водосбора являются реки Балхаш-Алакольского бассейна, который является одним из 8 основных речных бассейнов в Казахстане. Бассейн простирается на территорию Китая и занимает площадь в 413 000 км<sup>2</sup>.

В связи с этим, обширная площадь, выходящая за рамки данного исследования не имеет отношения к области разработки; были очерчены водосборы небольшого размера на плато в районе рудника.

Плато, на котором расположен рудник выветривается по нескольким пересыхающим линиям водослива, образующим дендрический рисунок речной сети. Были определены восемь бассейнов водосбора, которые могут потенциально подвергнуться влиянию вследствие разработки рудника, в соответствии с рисунком 3.2.

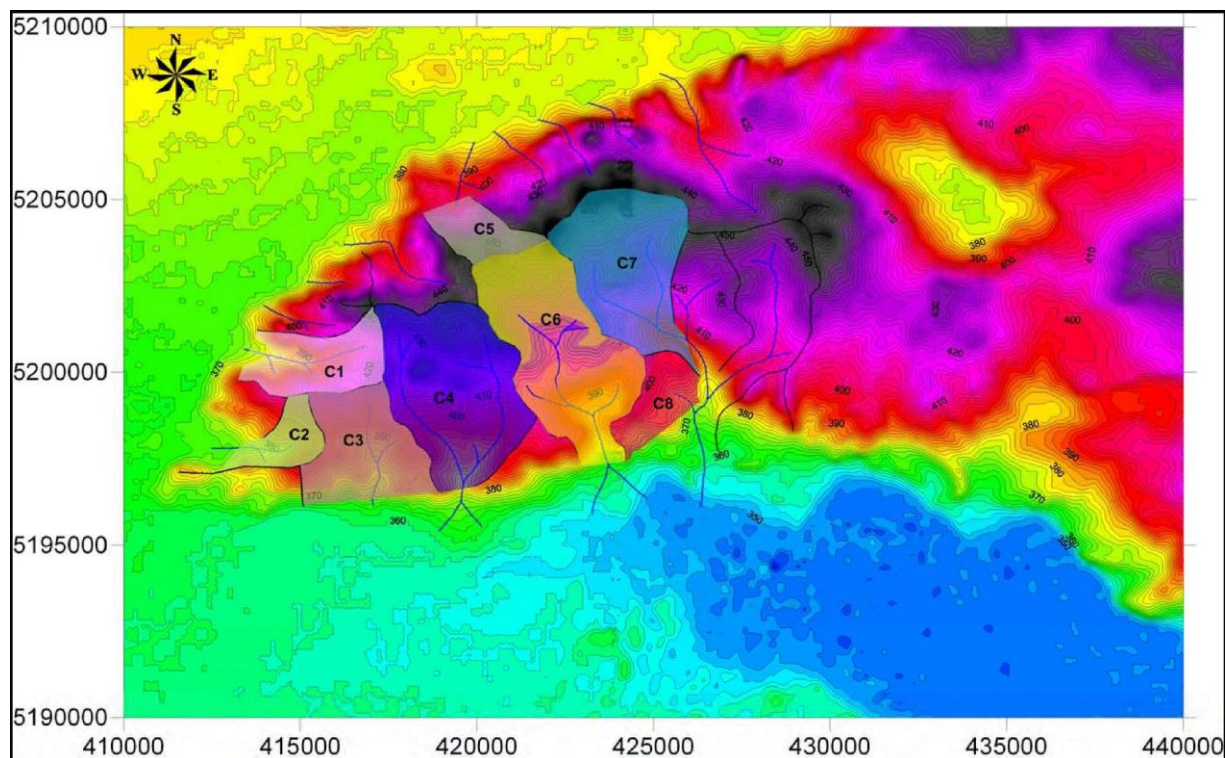


Рисунок 3.2 – Водосборные бассейны в пределах месторождения Актогай

Геоморфологические характеристики водосборных площадей приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Геоморфологические характеристики бассейна водосбора

Бассейн водосбора	Протяженность (км)	Площадь (км <sup>2</sup> )	Уклон (м/м)
C1	4.84	6.98	0.022
C2	3.14	4.78	0.017
C3	4.44	12.79	0.016
C4	7.07	18.80	0.011
C5	2.71	2.99	0.022
C6	7.73	17.01	0.012
C7	4.2	10.7	0.014
C8	1.96	3.12	0.018

Участок хвостохранилища приурочен к водосборному бассейну C3, как показано на рисунке 3.3. Площадь этого водосбора будет полностью покрыта слоем отвалов в 20-40м. Восточная часть этого водораздела, а также большинство дренажных линий будут навсегда изменены или уничтожены. Большие ограничительные стены будут построены для того, чтобы

сдерживать площадь занимаемой поверхности хвостохранилища и предотвращать перелив отвалов за пределы этого водосбора в водосбор С4.

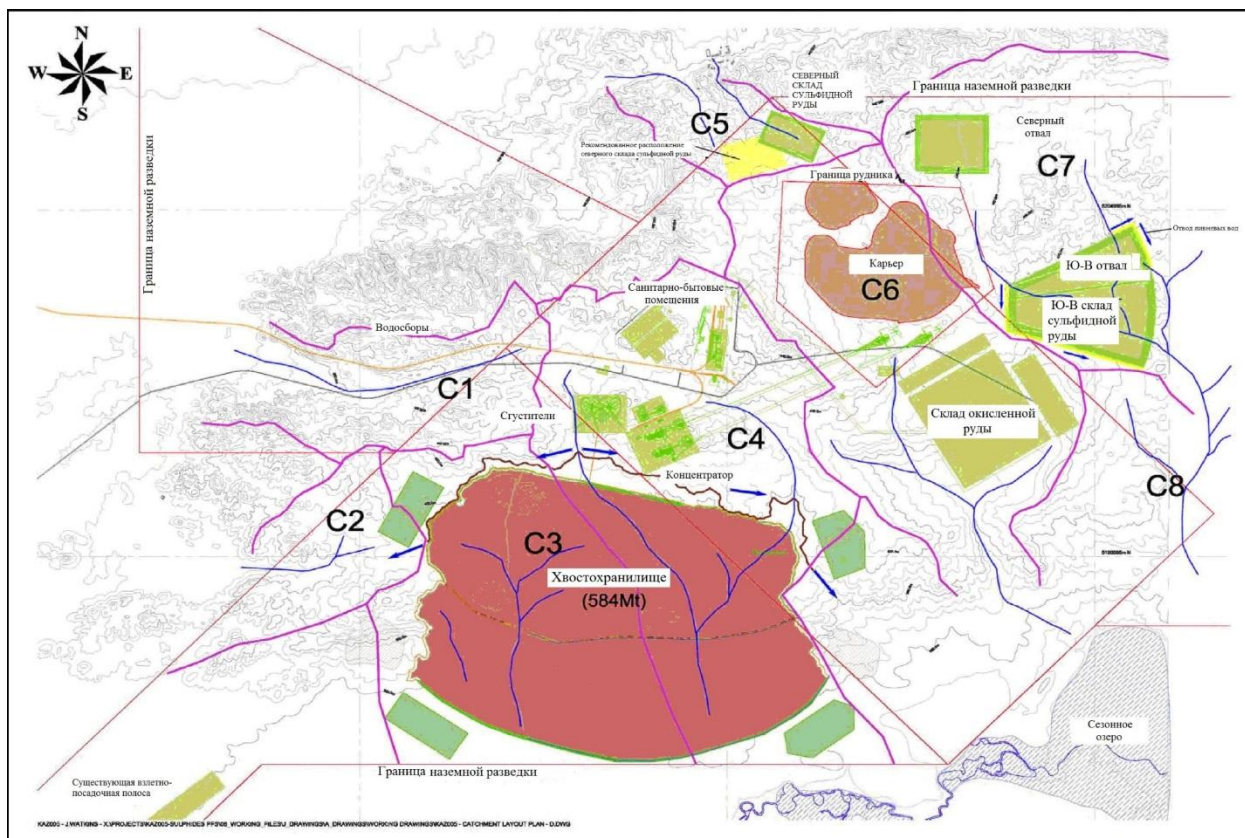


Рисунок 3.3 – Расположение объектов инфраструктуры Актогайского ГОК на водосборных бассейнах

Бассейн водосбора С3 водосбора занимает площадь в 12,79 км<sup>2</sup> и имеет максимальную протяженность в 4,44 км. На этот бассейн будет оказано существенно влияние, что вызовет соответствующие изменения, так как большая часть поверхности его площади будет охватываться хвостохранилищем. Фактически, бассейн водосбора, будет скрыт под 20-40м хвостов, что сделает это воздействие постоянным.

Данными режимных наблюдений установлено, что уровневый режим подземных вод характеризуется интенсивным весенним подъемом, связанным со снеготаянием и весенними дождями. Подъем уровня воды начинается в марте, апреле, затем до осени идет плавный спад уровня, связанный с расходом воды на подземный сток, испарение и транспирацию. Минимум уровня отмечается в период прекращения питания подземных вод: в декабре – феврале. Амплитуда колебания уровня, в зависимости от условий питания и мощности зоны аэрации, изменяется от 0,24 м до 3,9 м. Второй, значительно меньший по величине, подъем уровня отмечается осенью, когда вследствие резкого уменьшения испарения несколько увеличивается питание подземных вод.

### 3.3 Гидрологические условия участка хвостохранилища

В южном направлении в 500 м от юго-восточной насыпи хвостохранилища (рисунок 3.3) проходит русло ручья безымянного.



Рисунок 3.3 – Ручей безымянный

Ручей без названия протекает в восточном направлении, по административной границе, между Восточно-Казахстанской и Алматинской областью.

В настоящее время ручей без названия изучается в гидрологическом отношении. Ручей без названия, небольшой по протяженности, временный водоток расположен в пониженной части местности и относится к бассейну Алакольской группы озер. Рассматриваемый ручей без названия является малым водным объектом. Другие поверхностные водотоки в районе месторождения Актогай отсутствуют.

Ручей безымянный преимущественно сезонного характера наполнения т.е. образуются от стока дождевых, талых вод или при выходе на поверхность подземных вод. Однако в середине лета на дне русла грунт оставался еще влажным и вязким. В октябре с увеличением количества осадков в данном районе ручей безымянный вновь стал наполняться, но до уровня весеннего уровня не дошел. По руслу ручья образовались лужи с максимальной длиной 200 метров, шириной до 8 метров и глубиной от 3 до 10 см.

Были рассчитаны величины максимальных расходов воды по ручью безымянный при различной степени водообеспеченности для двух створов. Наибольшая глубина воды не превышает 1,1-1,4 м, скорости течения

незначительные (0,20-0,50м/с) из-за малых уклонов и не разработанности поймы.

### **3.3 Специализированная мониторинговая сеть для изучения влияния эксплуатации хвостохранилища на окружающую среду**

На сегодняшний день наблюдения на участках потенциального загрязнения подземных вод организованы в зоне аэрации на глубину залегания уровня грунтовых вод первого от поверхности водоносного горизонта, преимущественно в делювиально-пролювиальных верхнечетвертичных отложениях и в зоне открытой трещиноватости палеозоя в пределах площади производственной инфраструктуры, согласно требованиям законодательства РК, базовыми из которых являются Экологический кодекс Республики Казахстан [2].

Согласно программы экологического контроля за период 2016-2017 гг. на границе СЗЗ Актогайского ГОКа было пробурено 25 наблюдательных скважин глубиной до 35 м.

Бурение сопровождалось отбором 75 проб для химического анализа воды в результате чего были получены фоновые значения макро- и микрокомпонентов: водородный показатель, жесткость общая, общая минерализация (сухой остаток), взвешенные вещества, окисляемость перманганатная, нефтепродукты, ПАВ, ХПК, БПК, бор, натрий + калий, кальций, магний, азот аммонийный, железо общее, карбонаты, гидрокарбонаты, сульфаты, хлориды, нитриты, нитраты, фтор, ксантогенаты. Таким образом, на начальном этапе наблюдений была получена гидрохимическая информация, характеризующая фоновые показатели участка, среди которых наблюдалось превышение ПДК таких загрязняющих веществ и показателей как азот аммонийный (до 13,8 мг/л), натрий (до 656,1 мг/л), нефтепродукты (до 1,087 мг/л), окисляемость перманганатная (до 7 мг/л), сульфаты (до 2799,8 мг/л), сухой остаток (до 6898,1 мг/л), хлориды (до 1382,2 мг/л), ксантогенаты (до 0,9 г/л).

Далее, в процессе отработки месторождения и увеличения антропогенной нагрузки будет отслеживаться динамика техногенного воздействия.

На сегодняшний день наблюдения организованы на участках транзита подземных вод от области питания по направлению к зонам разгрузки и к границам санитарно-защитной зоны предприятия. На этот же горизонт оборудована сеть наблюдательных скважин глубиной до 35 м по границе санитарно-защитной зоны производственных объектов (карьер с инфраструктурой и системой карьерного водоотлива, отвалы вскрышных пород и отвал бедных сульфидных руд, площадка кучного выщелачивания, завод жидкостной экстракции и электролиза, обогатительная фабрика по

переработке сульфидных руд, хвостохранилища, вахтовый поселок и объекты инфраструктуры предприятия).

По мере сбора данных и анализа ситуации наблюдательная сеть будет пересматриваться и расширяться с учетом изменения гидрогеологической обстановки.

Учитывая, что площадь месторождения покрыта с поверхности слабопроницаемыми, практически безводными делювиально-пролювиальными покровными отложениями, основным потенциальным объектом техногенного воздействия становятся водоносные горизонты средне-верхнечетвертичных аллювиально-пролювиальных отложений ( $арQ_{II-III}$ ) и современных аллювиальных отложений ( $аQ_{IV}$ ), примыкающие к границе санитарно-защитной зоны рудника с северной, северо-западной и южной сторон месторождения. На самом месторождении в пределах обрабатываемого участка горных работ водоносные горизонты с пресной или слабо солоноватой водой, которые могут быть подвержены загрязнению, отсутствуют.

В рамках Программы ПЭК при гидрохимическом опробовании ежеквартально осуществляются наблюдения за следующими показателями: водородный показатель, сухой остаток, жесткость общая, поверхностно-активные вещества, окисляемость перманганатная, фенолы, сульфаты, алюминий, мышьяк, бор, барий, бериллий, кальций, кадмий, хлориды, кобальт, карбонаты, цианиды, хром, медь, фториды, железо общее, ртуть, калий, магний, марганец, молибден, натрий, аммоний солевой, никель, нитриты, нитраты, свинец, цинк, стронций, селен, ванадий, фосфаты, сурьма, нефтепродукты, ксантогенаты.

Кроме того, проводятся наблюдения за режимом подземных вод, включая уровень и температуру подземных вод.

Наблюдения за состоянием грунтовых вод выполняются экологической службой предприятия.

На первом этапе (до 2022 года) наблюдения будут проводиться по режимной сети, включающей 25 наблюдательных скважин. Результаты наблюдений по этим скважинам позволяют установить необходимость и направление дальнейшего развития сети, число дополнительных наблюдательных скважин и их местоположение.

### **3.4 Результаты мониторинга за состоянием подземных вод в зоне влияния хвостохранилища**

Мониторинг воздействия на водные ресурсы производится инструментальными замерами на наблюдательной сети мониторинговых скважин один раз в квартал. При эксплуатации объектов хвостохранилища предусмотрены наблюдательные скважины для осуществления контроля подземных вод. Наблюдательные скважины расположены по периметру



хвостохранилища на границе СЗЗ в количестве 12 штук, по которым ежеквартально проводится мониторинг состояния грунтовых вод, как показано на рисунке 3.7.

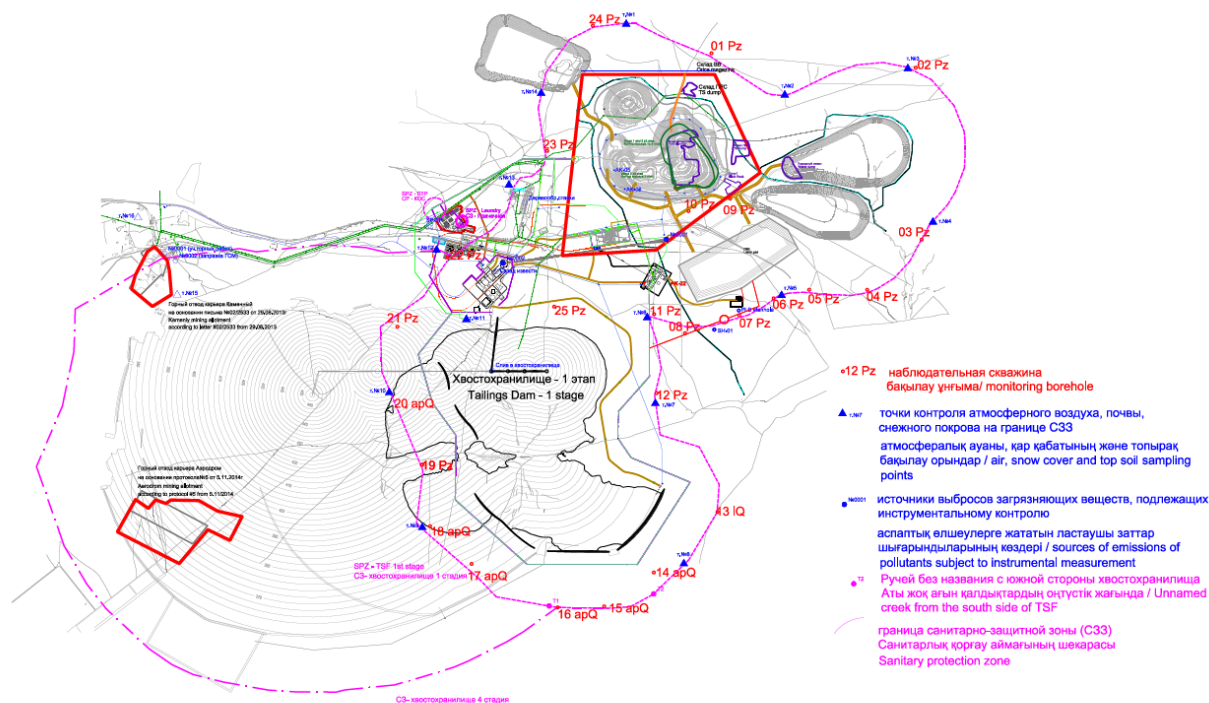


Рисунок 3.7 – Наблюдательная сеть подземных вод Актогайского ГОК

Сравнительный анализ концентраций химических компонентов и минерализации жидкой фазы хвостов обогащения, сбрасываемых в хвостохранилище с аналогичными значениями фоновых концентраций подземных вод за пределами зоны деятельности Актогайского ГОК приведен в таблице Б.1 Приложения Б.

По многим показателям фоновое качество подземных вод превышает предельно-допустимые концентрации химических компонентов. В целом подземные воды на месторождении Актогай и, непосредственно, на участке хвостохранилища по Санитарным Правилам № 209 от 16.03.2015г. «Вода питьевая» являются непригодными для питьевых целей.

В свою очередь качество хвостов обогащения не многим отличается от подземных вод. Наблюдается превышение водородного показателя, хвосты характеризуются более щелочной средой. Также имеется высокое содержание нефтепродуктов (в полтора раза выше норм ПДК). Содержание таких металлов как медь, хром, цинк и мышьяк хоть и находится в пределах допустимых концентраций, но превышает содержание в подземных водах в пределах санитарно-защитной зоны хвостохранилища.

На таблице Б.2 Приложения Б приведено сравнение результатов анализа качества подземных вод наблюдательных скважин хвостохранилища с фоновыми значениями. Как видно из таблицы, ухудшения химического состава и минерализации подземных вод не наблюдается.

Анализ результатов операционного мониторинга, выполненных в ходе мониторинга воздействий, показал, что воздействие предприятия ТОО «KAZ Minerals Aktogay» (КАЗ Минералз Актогай) на окружающую среду оценено как допустимое.

## **4 Математическое моделирование массопереноса загрязняющих веществ из хвостохранилища в подземные воды**

Региональные закономерности формирования подземных вод определяются геологическим строением, литолого-фациальными особенностями водовмещающих пород, условиями питания и разгрузки подземных вод. При пространственных масштабах, характерных для региональных потоков, параметры среды, определяющие фильтрационную способность подземных вод, обладают сильной изменчивостью. Величина одного и того же параметра может меняться на несколько порядков. Совокупность подобных факторов приводит к тому, что условия формирования подземных вод весьма сложны и использование аналитических методов для их изучения встречает значительные трудности. При таких масштабах процессов математическое моделирование, как правило, является единственным средством прогнозирования движения подземных вод.

Для широкого круга задач моделирование миграции подземных вод естественным образом разделяется на два этапа: моделирование геофильтрации — собственно потоков подземных вод, и моделирование массопереноса — переноса вещества с потоком подземных вод.

В численном решении дифференциальных уравнений геофильтрации достигнуты существенные успехи. Создан ряд программных продуктов, позволяющих решать практические задачи с использованием готовых алгоритмов, не прибегая к программированию [3].

В этой диссертационной работе рассматриваются использование MT3DMS, модульной трехмерной программы, для моделирования процесса массопереноса в системах подземных вод с конечными разностями, часто используемого с MODFLOW.

MT3DMS предназначен для моделирования изменений концентраций поступающих в трехмерные системы потока подземных вод загрязняющих веществ с учетом адвекции, дисперсии, молекулярной диффузии и некоторых основных химических реакций, с различными типами граничных условий. Химические реакции, включенные в MT3DMS, представляют собой контролируемое равновесие или ограниченную скоростью линейную или нелинейную сорбцию, радиоактивный распад или биodeградацию первого порядка и реакцию или производство нулевого порядка [4].

### **4.1 Обзор программного обеспечения Visual MODFLOW Flex**

В рамках выполнения диссертационной работы MT3DMS применялся на базе программного обеспечения Visual MODFLOW Flex для построения трехмерной конечно-разностной гидрогеологической модели потока подземных вод на основе решения уравнения потока подземных вод. На

рисунке 4.1 изображено стандартное рабочее окно программы Visual MODFLOW Flex.

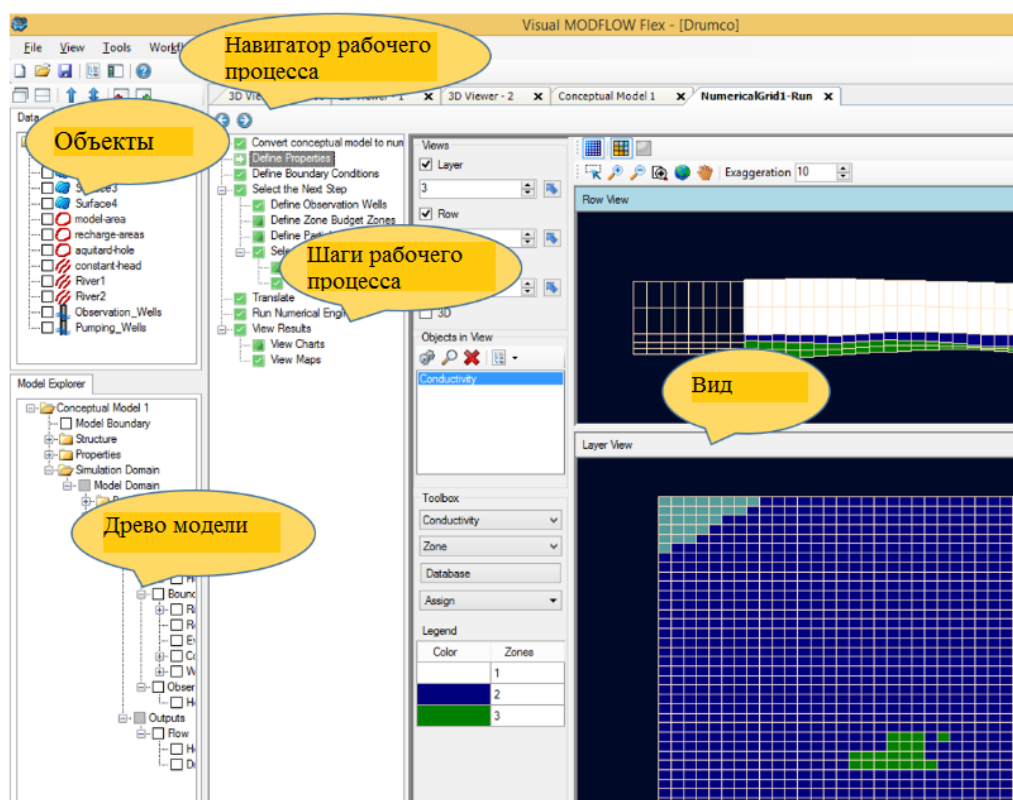


Рисунок 4.1 – Стандартное рабочее окно программного обеспечения Visual MODFLOW Flex

Все данные, с которыми вы взаимодействуете в Visual MODFLOW Flex, называются объектами данных, которые отображаются в разделе окна Data Objects (Объекты данных). Они могут состоять из:

а) Исходные данные:

- 1) Импортированные из полилинейных или полигональных шейп-файлов, скважин из электронной таблицы, поверхностей из Surfer .GRD и т.д;
- 2) Созданные путем оцифровки точек, полигонов или полилиний;

б) Концептуальные объекты данных, которые создаются по мере выполнения рабочего процесса концептуального моделирования и включают: горизонты, структурные зоны, зоны свойств и граничные условия;

в) Объекты данных математической модели. Они генерируются по мере выполнения рабочего процесса математического моделирования и включают:

1) Заданные значения: численная сетка, гидродинамические параметры (коэффициенты фильтрации, начальные напоры и т.д.), граничные условия (области руслового питания, области разгрузки подземных вод, водозаборные скважины), наблюдательные скважины, участка расчета баланса подземные вод и маркеры потока подземных вод;

2) Результаты моделирования: расчетные напоры, понижение уровня подземных вод, линии напоров и т.д.

Каждый объект данных будет иметь флажок рядом с ним, что позволяет отображать его в различных двумерных и трехмерных режимах презентации. Объекты данных могут быть переупорядочены, переименованы или сгруппированы в папки данных.

Каждый объект данных также имеет параметры, каждый из которых можно редактировать, щелкнув правой кнопкой мыши на объект данных в дереве и выбрав параметры.

Многие диалоговые окна Visual MODFLOW Flex требуют выбора объектов данных из древа объектов или модели, например, при определении водоносных горизонтов, создании зон с различными свойствами и назначении атрибутов граничным условиям.

Если рядом с полем ввода в диалоговом окне или мастере отображается синяя стрелка, это означает, что требуется выбор объекта данных.

Раздел рабочего окна Model Explorer (древо модели) содержит в себе все концептуальные и математические модели, а также соответствующие объекты данных для проектирования. В древо модели включена опция поиска, которая автоматически фильтрует элементы в дереве на основе того, какая информация была введена.

Объекты данных могут отображаться в одном или нескольких окнах вида (2D/3D Viewers):

- 2D вид: двухмерный вид в плане, который идеально подходит для визуализации ГИС данных, поверхностей, местоположения скважин, растровых изображений и т. д;

- 3D вид: идеально подходит для данных которые имеют значения X, Y и абсолютной отметки (Z): структурные зоны, скважины, направление потока, значения напоров в разрезе и т. д;

- Средство просмотра «Flex»: доступно в рабочем процессе математического моделирования и состоит из комбинации вида слоя, строки и столбца и 3D-вида.

Моделирование подземных вод состоит из ряда шагов, которые необходимо выполнить в определенной последовательности для достижения конкретной цели. В Visual MODFLOW Flex эти шаги представлены в рабочем процессе (Workflow). В окне Workflow отображены шаги, которые составляют рабочий процесс, и на каждом шаге есть соответствующий

графический интерфейс, с которым происходит взаимодействие проектировщика.

В Visual MODFLOW Flex существуют отдельные рабочие процессы для математического, концептуального моделирования и PEST (режим оценки параметров и анализ чувствительности конечной модели).

Как видно из рисунка 4.2, окно рабочего процесса содержит панель инструментов и список шагов, необходимых для текущего рабочего процесса.

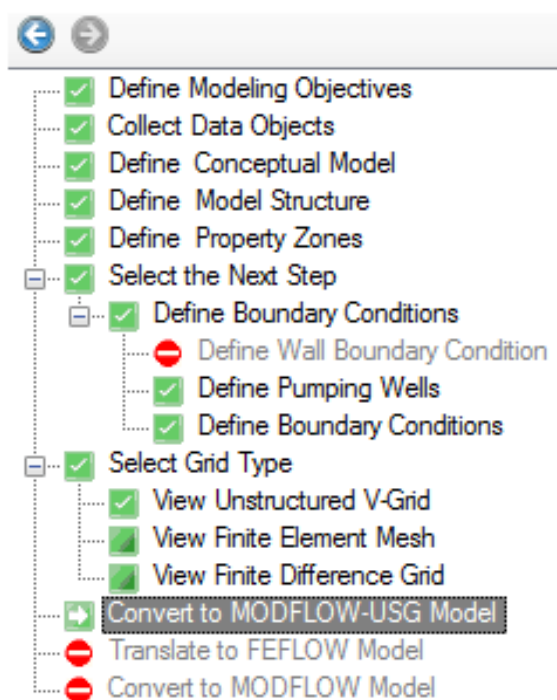


Рисунок 4.2 – Панель инструментов окна рабочего процесса

## 4.2 Моделирование движения подземных вод и переноса загрязняющих веществ

В этой главе приведено описание построения математической модели массопереноса загрязняющих веществ в подземные воды на участке хвостохранилища, а также результаты моделирования.

При открытии программы были заданы единицы измерения основных параметров потока подземных вод, и система координат привязки объектов моделирования UTM зона 44N (WGS84), как показано на рисунке 4.3.

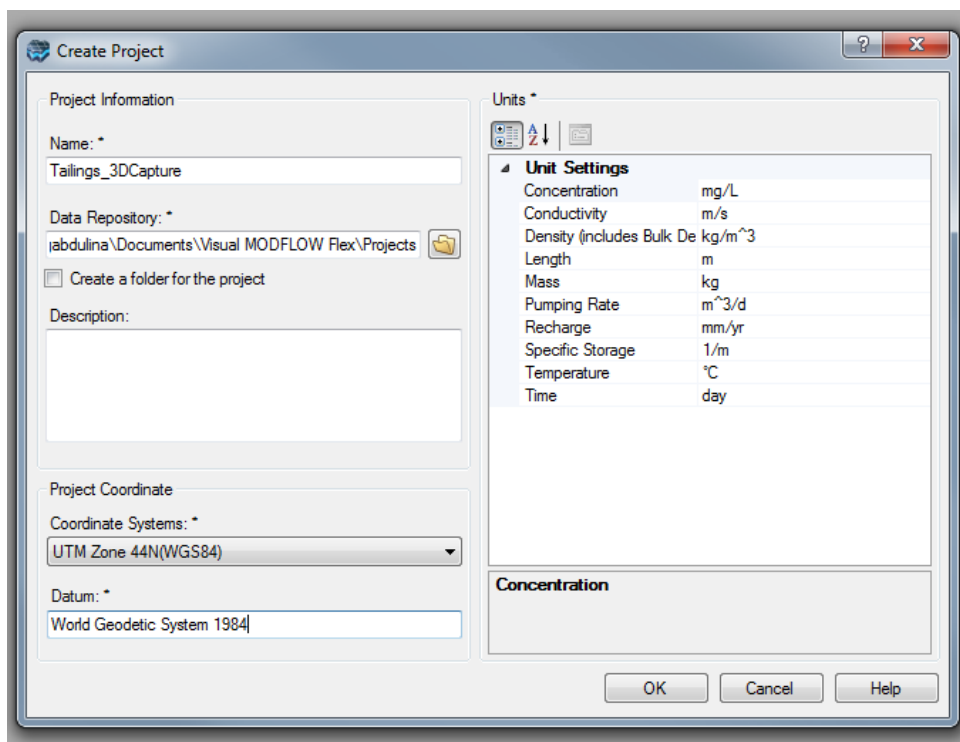


Рисунок 4.3 – Диалоговое окно «Создание проекта»

Как изображено на рисунке 4.4, после того, как были установлены метрические единицы измерения гидрогеологических параметров, программа предлагает определить два сценария: «Концептуальное моделирование» и «Математическое моделирование».

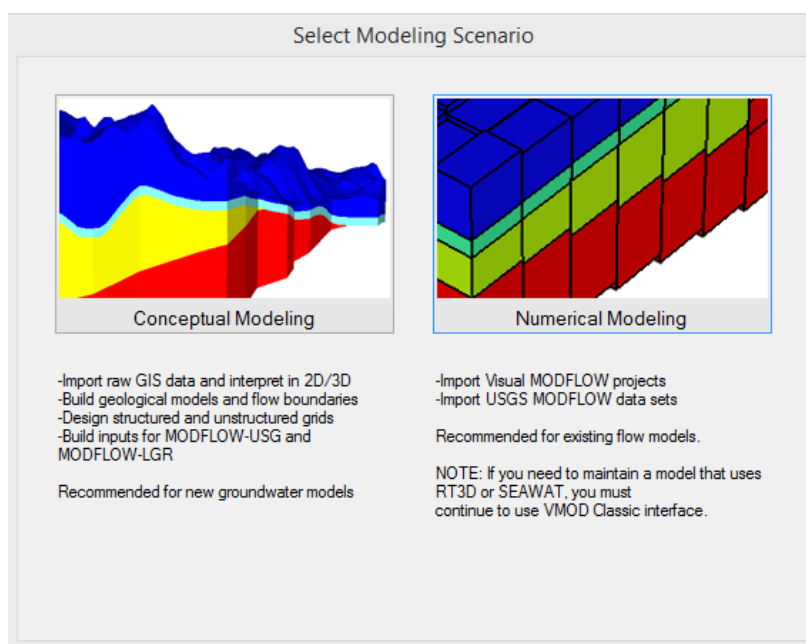


Рисунок 4.4 – Диалоговое окно «Выбор сценария моделирования»

Рабочий процесс концептуального моделирования позволяет импортировать все объекты данных в Visual MODFLOW Flex и создавать концептуальную модель участка CSM. Затем CSM можно использовать в качестве отправной точки для нескольких разных математических моделей. Другими словами, математическая модель может быть быстро и легко создана на основе одной и той же концептуальной модели изучаемого участка. Это облегчает пользователю управление несколькими различными численными моделями с небольшими вариациями.

Исходя из цели диссертационной работы, моделирование продолжено в режиме математического моделирования. Следующим шагом (рисунок 4.5) является определение цели моделирования (Define Model Objectives) можно, где можно указать, какая модель будет запущена (например, по режиму потока, будет ли учитываться массоперенос загрязняющих веществ и т.д.), задать некоторые параметры проекта, присваиваемые по умолчанию (коэффициент фильтрации, водоотдача и т.д.).

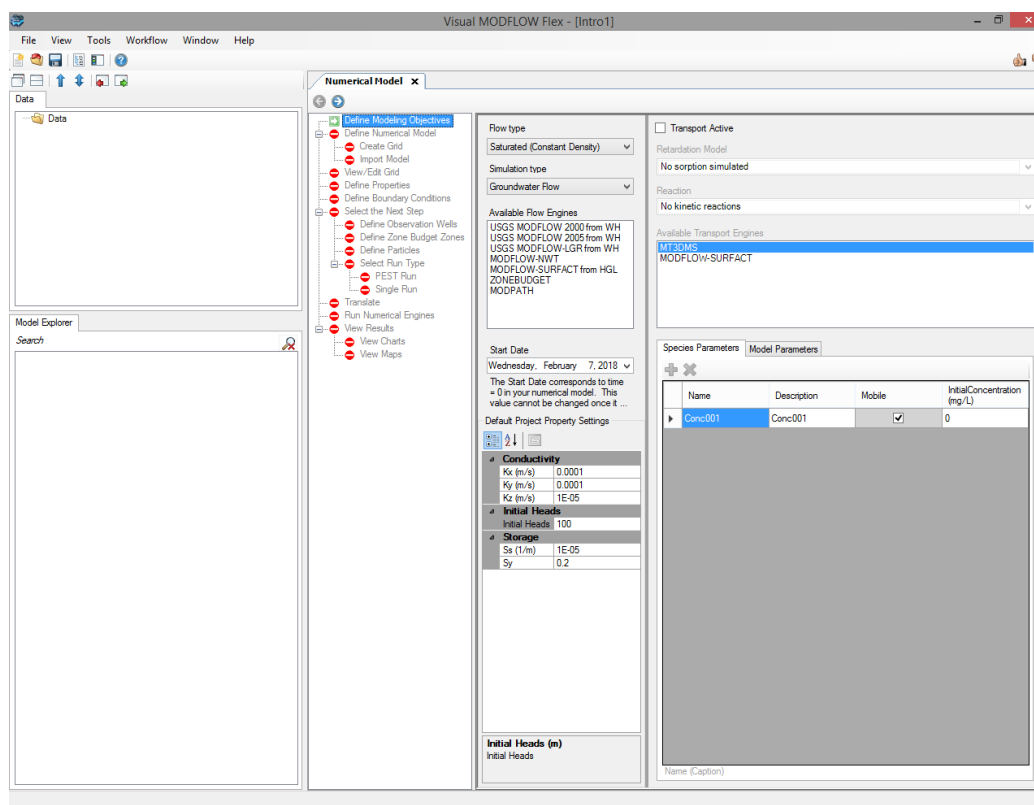


Рисунок 4.5 – Диалоговое окно Определение целей моделирования

На данном этапе необходимо изменить дату начала моделирования. В выпадающем окне установили число 16 декабря 2016 года, что соответствует дате сдачи в эксплуатацию Сульфидной фабрики Актогайского ГОК. Такие параметры, как водопроницаемость, начальные напоры и водоотдача на данном этапе были оставлены без изменений, по умолчанию.



В следующем шаге предлагается определить границу математической модели. Данная команда позволяет импортировать существующую сетку или создать новую. В настоящей модели была создана сетка конечных разностей, в пределах которой в дальнейшем были заданы граничные условия и изображен источник потенциального загрязнения. Для дальнейшей привязки объектов данных были заданы географические координаты привязки угловых точек сетки как показано на рисунке 4.6.

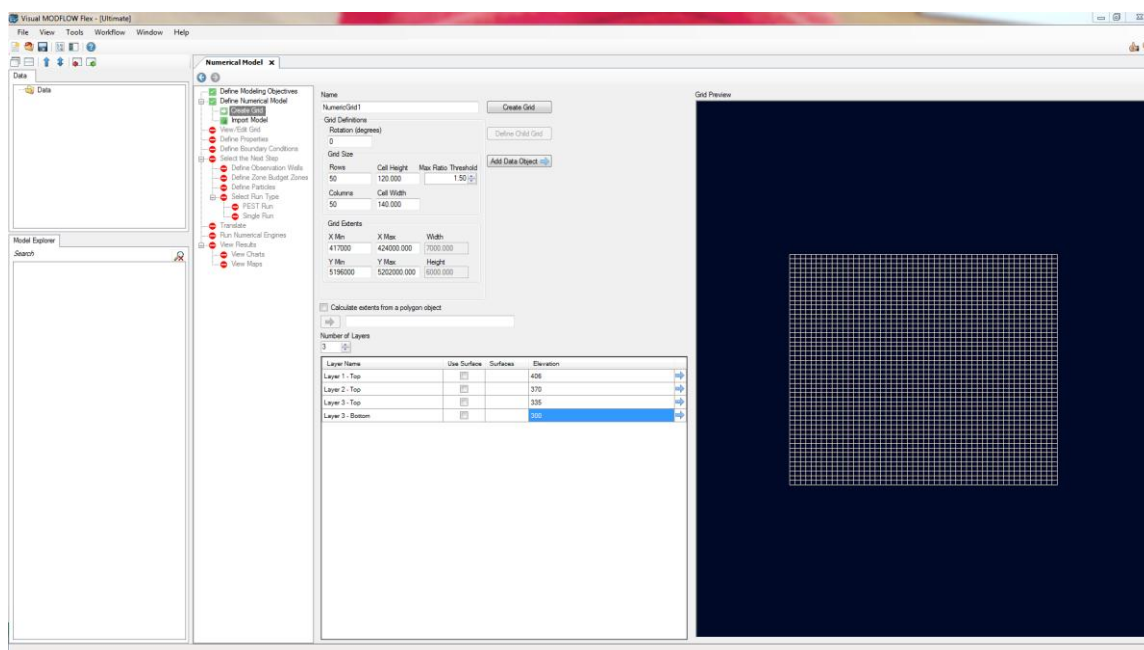


Рисунок 4.6 – Вид окна «Создание сетки»

Сетка определяет пределы математической модели и ее структуру, размерность сетки соответствует площади водосбора СЗ (смотрите раздел 3.2). Область моделирования ограничена мониторинговой сетью наблюдательных гидрогеологических скважин, граничными условиями: водораздел в северной части сетки, и граница II рода представленная ручьем Безымянным на юге. Находящийся ниже по рельефу от хвостохранилища Безымянный ручей также является компонентом экосистемы, на который вероятно негативное воздействие и разгрузка загрязняющих веществ.

В этом же окне определяется число слоев моделирования и их интервалы залегания, что соответствует:

- 1 слой, занимаемый хвостами обогащения;
- 2 слой, противofiltrационный слой суглинков;
- 3 слой, толщина скальных пород.

Visual Modflow Flex позволяет импортировать растровые изображения, файлы графической информации формата dxf и прочее. Таким образом в настоящую модель был импортирован снимок беспилотного летательного аппарата с привязкой по географическим координатам, а также файл с топографическими изолиниями, как показано на рисунке 4.7.

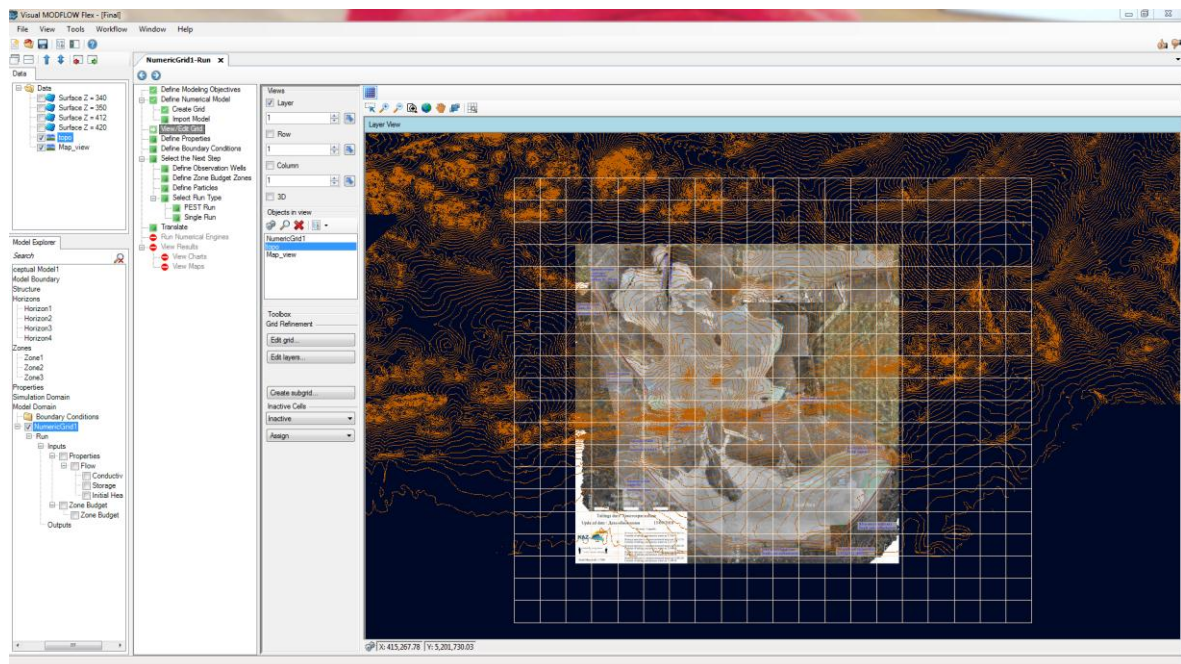


Рисунок 4.7 – Вид окна «Импорт данных»

Воспользовавшись данной функцией, теперь мы можем задавать области распространения источников загрязнения (границу хвостохранилища). Следующим шагом в моделирование является Определение свойств и граничных условий.

Для этого, перейдем к рабочему процессу |Define Properties в рабочем цикле и зададим гидродинамические параметры по каждому слою модели, для чего будут созданы три зоны свойств Property Zone. По умолчанию модели соответствует только одна зона свойств, параметры которой были определены в рабочем цикле «Определение цели моделирования». Кликнув на кнопку «Conductivity» в панели инструментов, мы перешли в окно редактирования фильтрационных свойств зоны, как показано на рисунке 4.8.

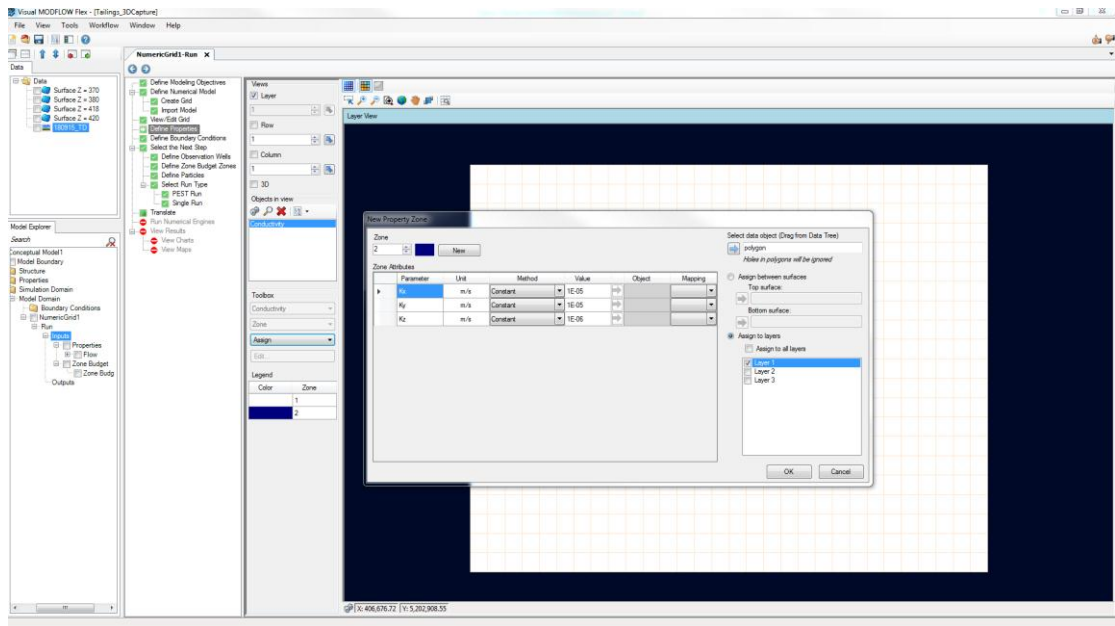


Рисунок 4.8 – Диалоговое окно «Создание новой зоны свойств»

В данном разделе мы можем редактировать значения коэффициентов фильтрации в плане и разрезе для каждого слоя, на основании которых будут созданы три различные зоны свойств (Properties Zone). Далее, из той же панели инструментов мы кликаем на кнопку «Storage», для редактирования и создания зон свойств со значениями водоотдачи по каждому слою.

В открывшемся окне «Создание новой зоны свойств» нам предлагается задать значения удельной и гравитационной водоотдачи, а также эффективной и общей пористости. На основании проектных данных, были заданы значения, как показано на таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения гидродинамических параметров по различным зонам моделирования.

Обозначение параметра в Visual MODFLOW Flex	Наименование параметра	1 зона	2 зона	3 зона
Kx	Коэффициент фильтрации по оси X, м/сек	0.0008	0.001	0.0102
Ky	Коэффициент фильтрации по оси Y, м/сек	0.0008	0.001	0.0102
Kz	Коэффициент фильтрации по оси Z, м/сек	8E-05	0.0001	0.001
Sy	Гравитационная водоотдача	0.01	0.01	0.003

Продолжение таблицы 4.1

Ss	Удельная водоотдача, 1/м	1E-05	1E-05	0.007
Er	Эффективная пористость	0.15	0.15	0.01
Tr	Общая пористость	0.2	0.2	0.45

После того, как были заданы все значения, окно просмотра модели в разрезе будет выглядеть следующим образом, как показано на рисунке 4.9 (цвет соответствует той или иной зоне свойств).

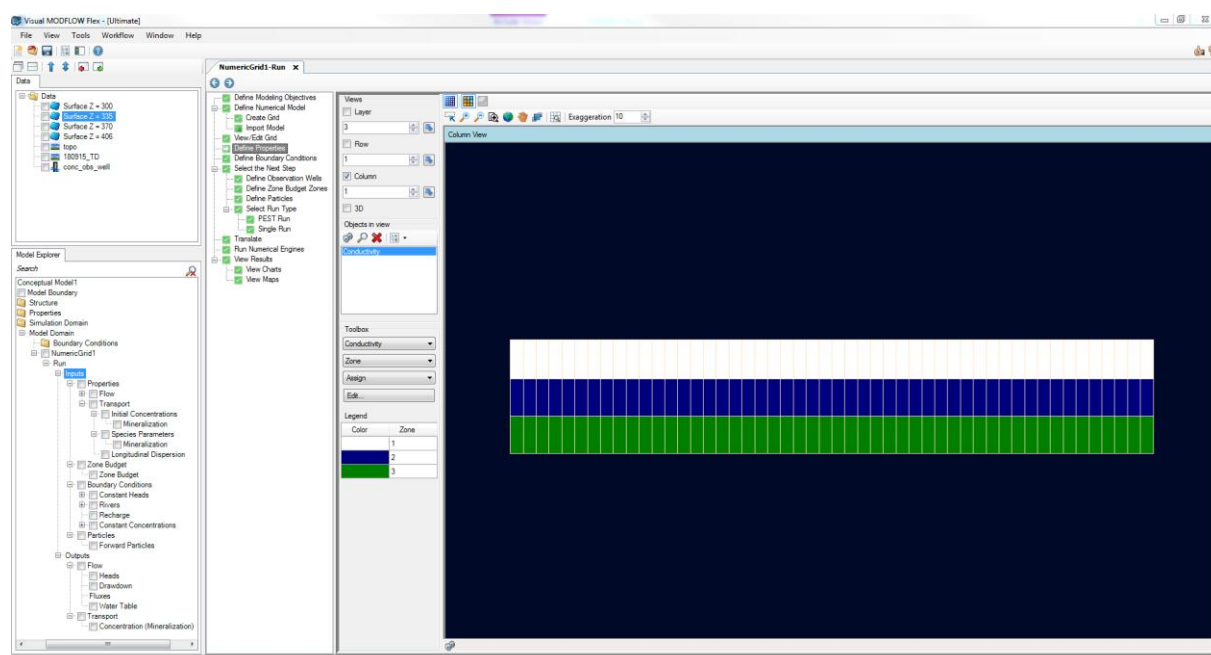


Рисунок 4.9 – Зоны гидродинамических свойств в разрезе

Далее мы можем приступить к определению граничных условий нашей области моделирования, для чего необходимо перейти к следующему шагу рабочего цикла. В первую очередь зададим область питания за счет инфильтрационного питания, которая будет приурочена к первому слою математической модели. Для этого нажимаем на кнопку «Питание» (Recharge), и в появившемся меню выберем режим «Назначить для всего слоя».

При суммарных годовых осадках 194мм количество инфильтрационного питания достигает в среднем 6,1 мм, остальная часть расходуется на испарение и транспирацию растениями. Таким образом, назначаем величину инфильтрационного питания 6,1 мм в год (рисунок 4.10).

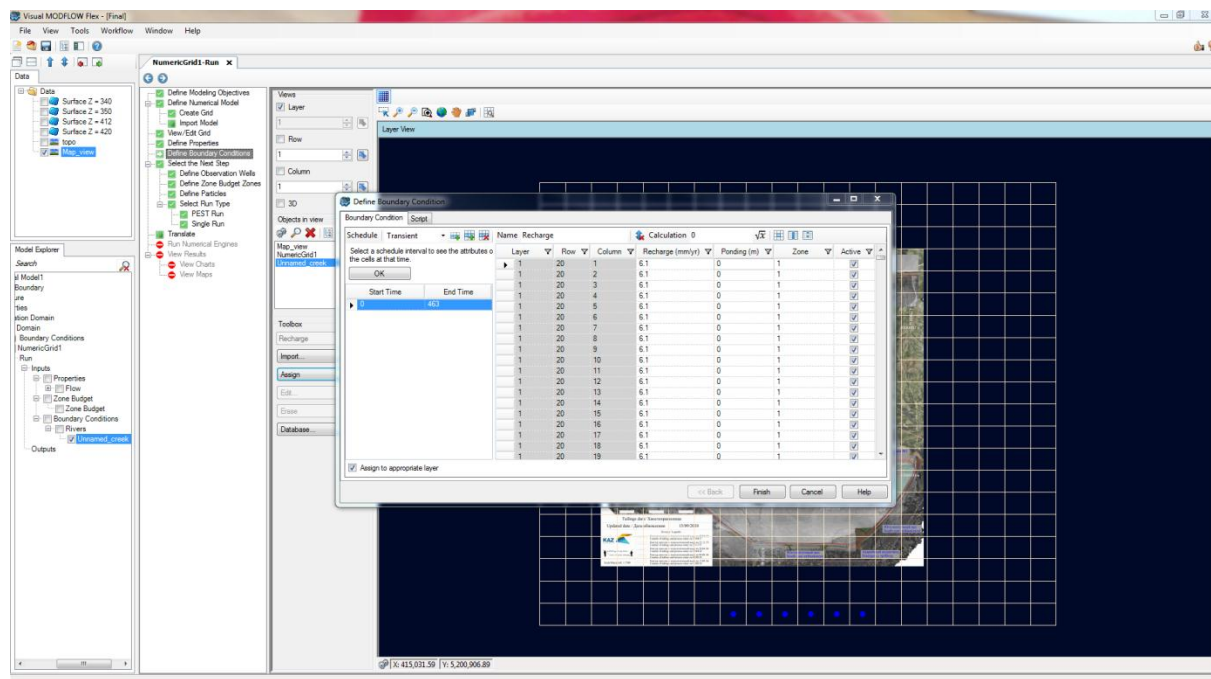


Рисунок 4.10 – Назначение области инфильтрационного питания

Как уже упоминалось выше, область моделирования должна захватывать уязвимые для загрязнения компоненты экосистемы. Так, южная граница модели проходит вдоль ручья Безымянного, который будет представлен в модели в виде граничного условия «River». Пакет «Река» используется для моделирования границ потока, зависящих от напора. В пакете River, если гидравлический напор в ячейке опускается ниже определенного порога, питание из реки в нижележащую ячейку модели устанавливается на указанную нижнюю границу. На основании проектных данных, представленных в разделе 3.3 настоящей диссертационной работы, были заданы параметры ручья Безымянного, как показано на рисунке 4.11.

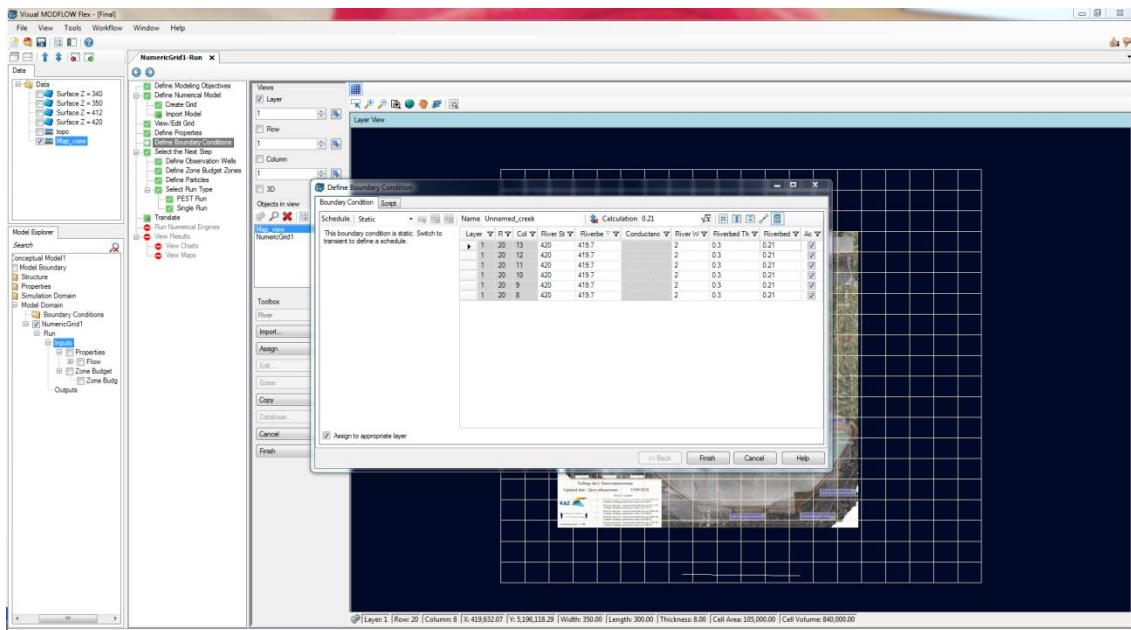


Рисунок 4.11 – Создание граничного условия «Река»

Математическая модель конечных разностей стационарного режима позволяет устанавливать границы с постоянным напором (Constant Head), что соответствует границе I рода [5]. Данная граница была задана за пределами зоны влияния хвостохранилища, выше по потоку и соответствующая линии водораздела на северной части области моделирования (рисунок 4.12).

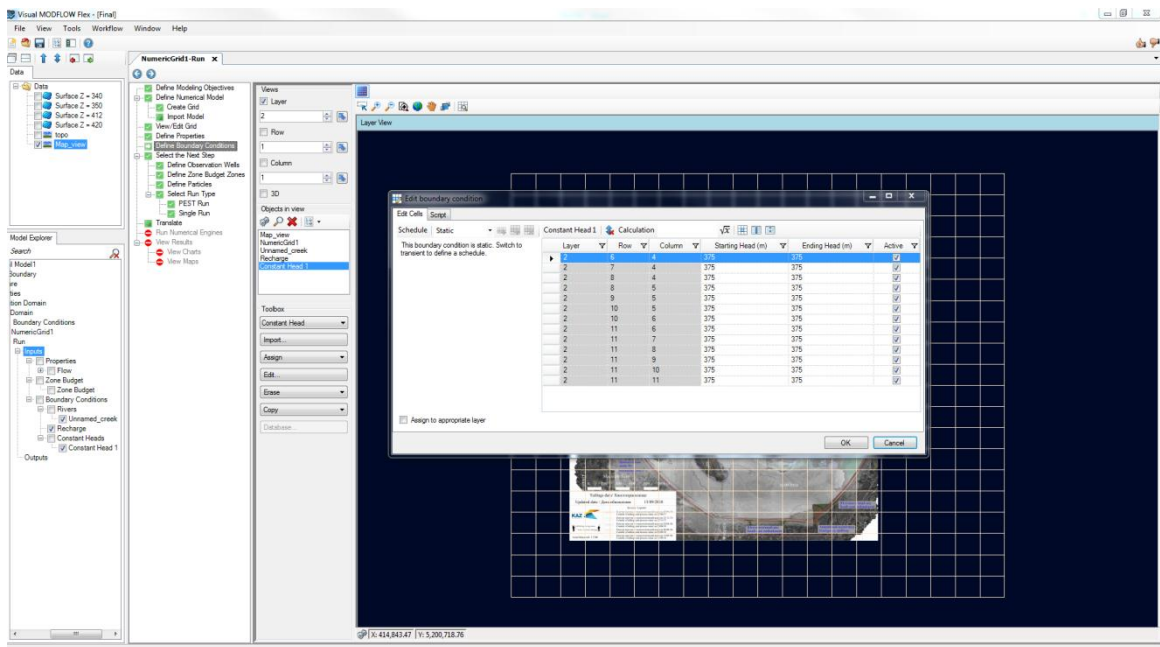


Рисунок 4.12 – Создание граничного условия с постоянным напором

После того, как мы задали все граничные условия, можно приступить к визуализации области распространения загрязняющего вещества. Visual

MODFLOW Flex позволяет выполнять прослеживание распространения потока подземных вод с помощью добавления частиц (Particles) в рабочем цикле «Определение частиц». Частицы могут быть назначены с помощью одного из трех методов: вручную, с использованием существующего объекта данных или путем размещения области вокруг источника загрязнения. В нашем случае, частицы были добавлены вручную, по первому слою модели на области размещения хвостов на хвостохранилище, как показано на рисунке 4.13.

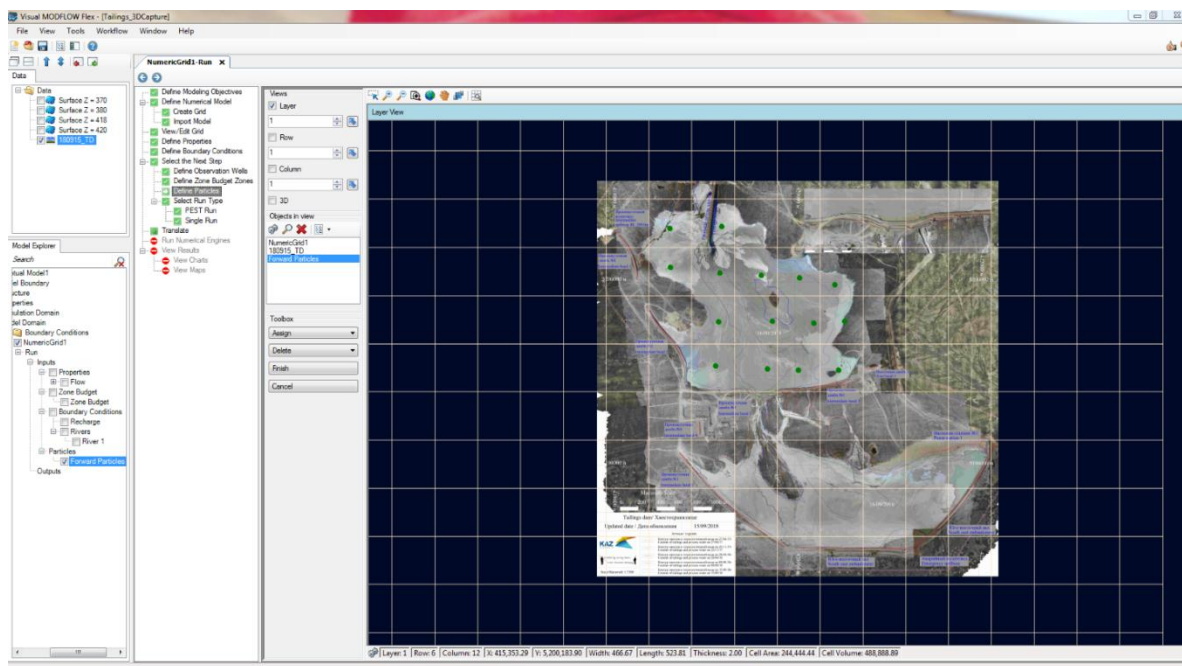


Рисунок 4.12 – Определение частиц

Направление потока загрязненных подземных вод будет указано на модели после этапа преобразования «Translate» (интерпретация) рабочего процесса моделирования.

Теперь мы готовы к запуску расчета модели потока подземных вод и симуляции массопереноса загрязняющих веществ с помощью движков MODFLOW 2005 и MODPATH, которые нужно выбрать на следующем этапе рабочего цикла.

На экране появятся настройки преобразования, как показано на рисунке 4.13, которые позволяют настраивать решатели и их параметры (количество итераций, критерий изменения напора, коэффициенты демпфирования), настройки пакета, управление результатами и т.д. В будущем мы можем увеличить максимальное количество итераций, если модель не будет сходиться с реальными результатами мониторинга подземных вод.

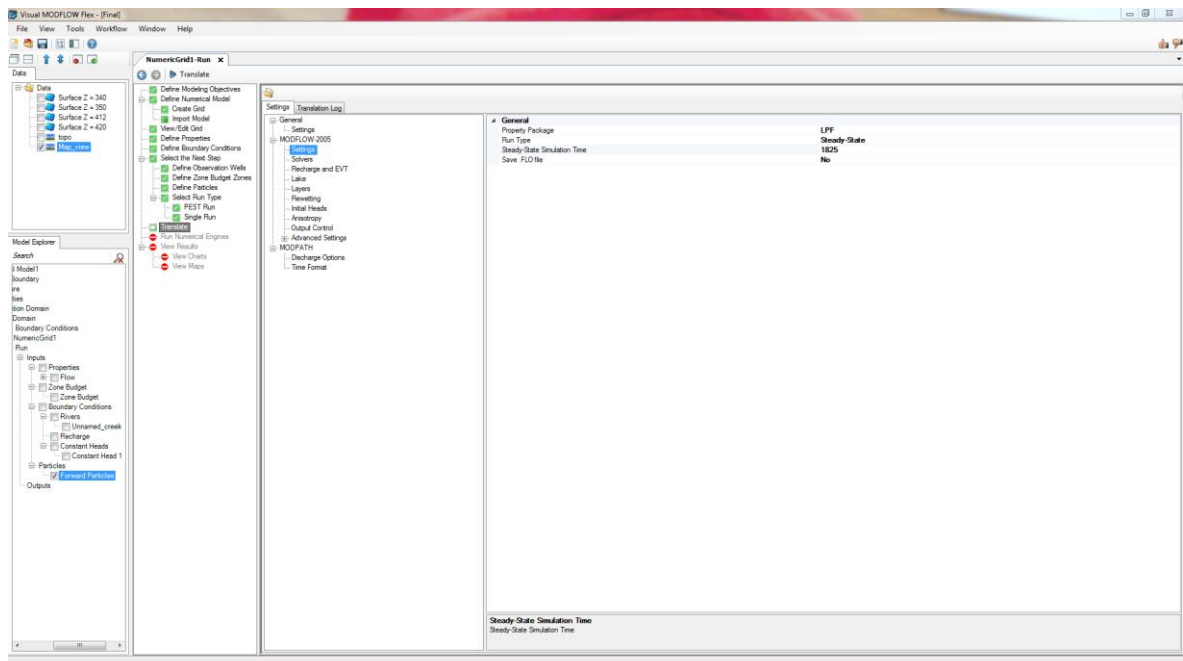


Рисунок 4.13 – Окно настройки MODPATH

Для расчетов будет использован стационарный режим потока подземных вод, время симуляции составит 1825 дней, что соответствует сроку эксплуатации первой стадии хвостохранилища. Для запуска симуляции необходимо нажать на кнопку «Translate» (интерпретация), в результате чего Visual MODFLOW Flex создаст все необходимые файлы для расчетов в USGS MODFLOW и MODPATH. Прогресс интерпретации данных может длиться 5-10 секунд. По завершению преобразования появилось сообщение ‘Translation Finished’, что говорит об успешном преобразовании модели. В следующем шаге рабочего цикла необходимо запустить математические решатели MODFLOW-2005 и MODPATH. Результаты расчета модели будут показаны в отдельных окнах, как показано на рисунке 4.14.



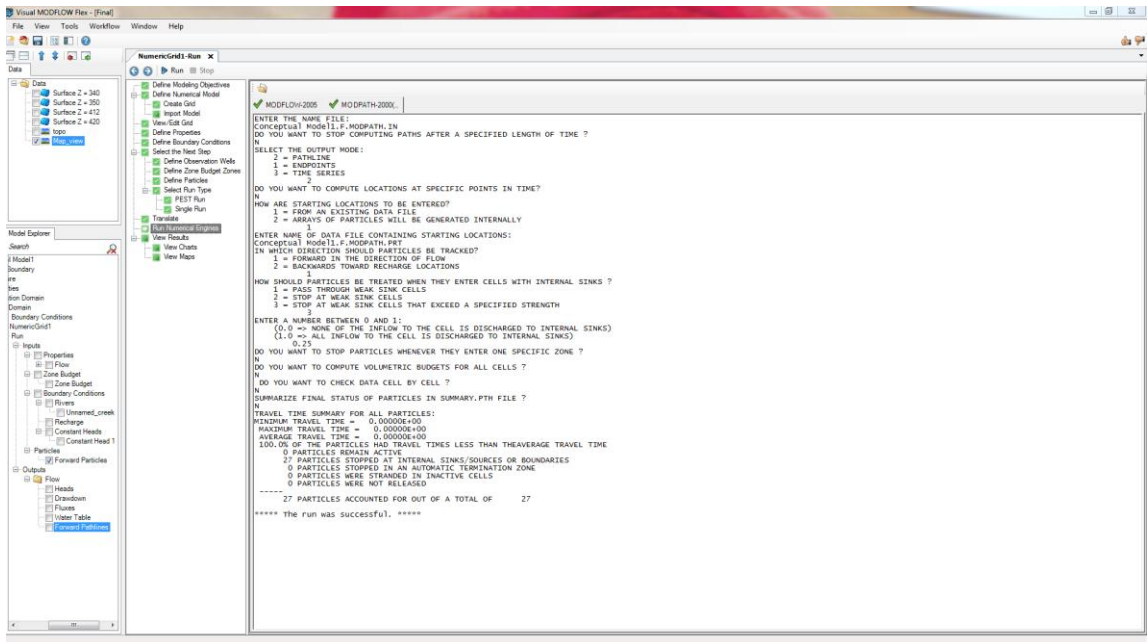


Рисунок 4.14 – Результаты успешного расчета движков MODFLOW-2005 и MODPATH

После того, как мы прогнали модель через соответствующие решатели, мы можем визуализировать результаты и наглядно демонстрировать область распространения загрязняющих веществ, как изображено на рисунке 4.15.

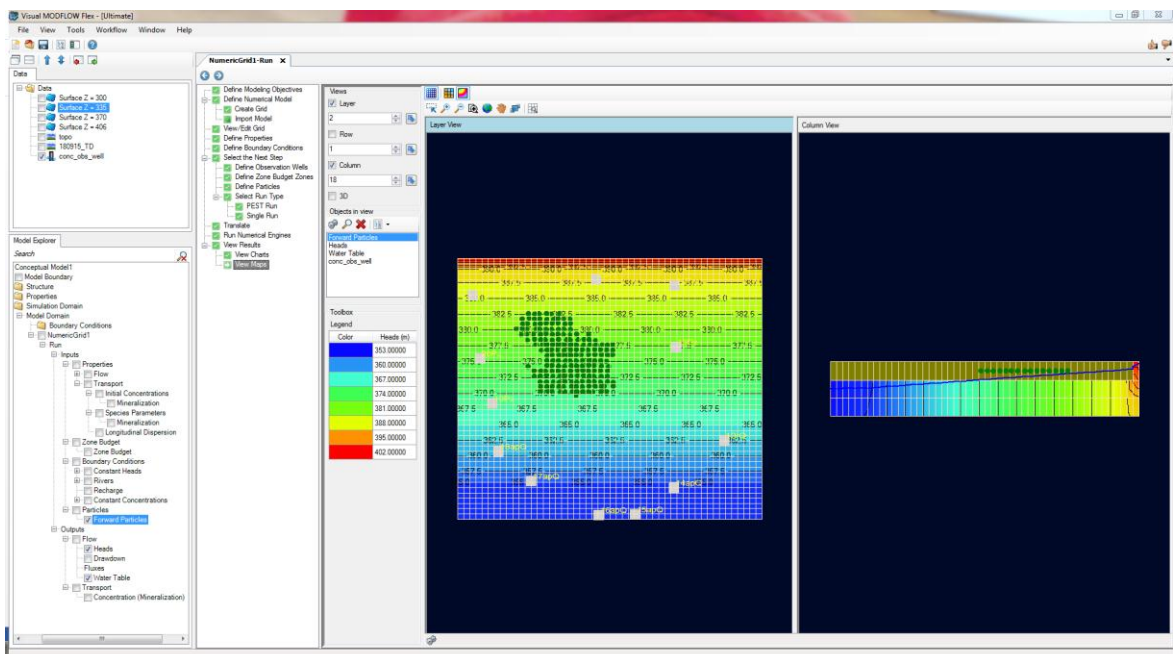


Рисунок 4.15 – Положение частиц в плане и разрезе

Как видно из рисунка, противодиффузионный слой непроницаемых пород предотвращает перемещение загрязняющих частиц, представленных в модели в виде точек (частиц) и задерживает их в верхнем, первом слое.

Следующей задачей математического моделирования заключается в симуляции массопереноса загрязняющих веществ и изменения минерализации подземных вод. Моделирование шлейфа загрязняющих веществ будет смоделировано на пятилетний период с использованием решателя MT3DMS. Прежде всего, вернемся в шаг рабочего цикла «Define Modeling Objectives», где мы изменим задачи математического моделирования, как показано на рисунке 4.16. На данном этапе мы выбираем решатель массопереноса MT3DMS и задаем фоновую концентрацию сухого остатка подземных вод, что соответствует 500 мг/л.

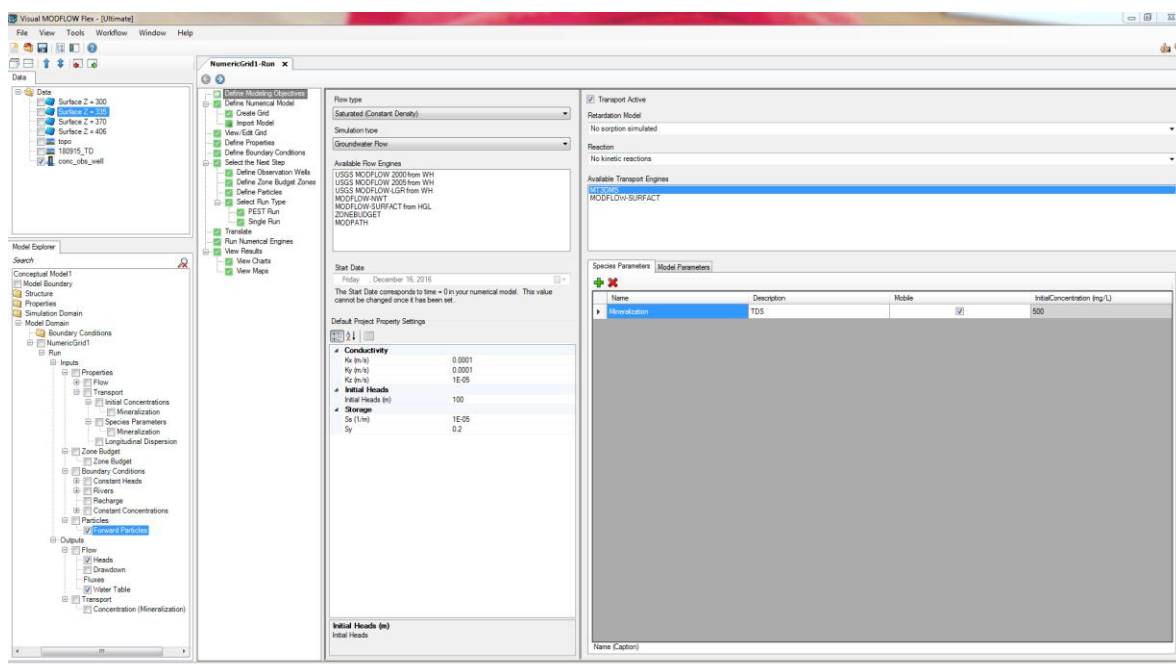


Рисунок 4.16 – Повторное определение задач моделирования

Чтобы увидеть, как изменяется минерализация подземных вод с течением времени, были добавлены наблюдательные скважины на границе зоны санитарной защиты. Это можно сделать через шаг рабочего цикла определения наблюдательных скважин «Define Observation Wells». Наблюдательные скважин будут загружены в модель через функцию импорта данных в виде табличных данных формата xls, которая содержит в себе сведения, как показано в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения гидродинамических параметров по различным зонам моделирования.

№	Координаты X	Координаты Y	Абс.отметка устья скважины	Абс.отметка забоя скважины	Глубина отбора пробы, м	Минерализация, мг/л	Время замера
11Pz	421979.642	5201376.658	400.768	365.768	375.768	500	12/16/2016
12Pz	422022.511	5199957.405	402.843	367.843	377.843	500	12/16/2016
13IQ	423124.365	5197810.791	352.854	337.854	347.854	500	12/16/2016
14apQ	421974.966	5196717.007	354.641	339.641	349.641	500	12/16/2016
15apQ	421079	5196106	355	340	350	500	12/16/2016
16apQ	420237	5196088	354	339	349	500	12/16/2016
17apQ	418685.108	5196873.614	358.245	343.245	353.245	500	12/16/2016
18apQ	417938.351	5197553.606	358.609	343.609	353.609	500	12/16/2016
19Pz	417791.628	5198659.492	380.29	345.29	355.29	500	12/16/2016
20Pz	417505.664	5199695.391	384.512	349.512	359.512	500	12/16/2016
21Pz	417346.975	5201153.102	405.661	370.661	380.661	500	12/16/2016
25Pz	420175.173	5201513.291	411.118	376.118	386.118	500	12/16/2016

После того, как были определены параметры импортируемого файла, окно «Импорт данных» примет следующий вид (рисунок 4.17).

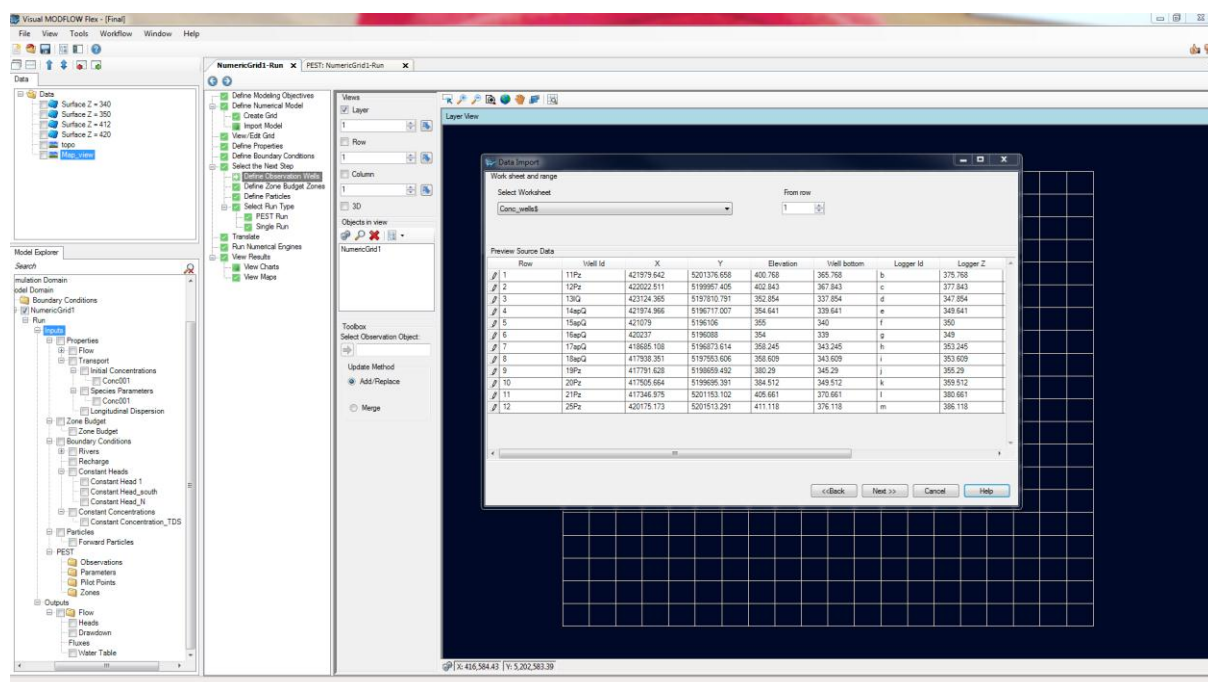


Рисунок 4.17 – Окно импорта данных

Наблюдательные скважины будут отображены в окне Visual MODFLOW Flex как показано на рисунке 4.18.

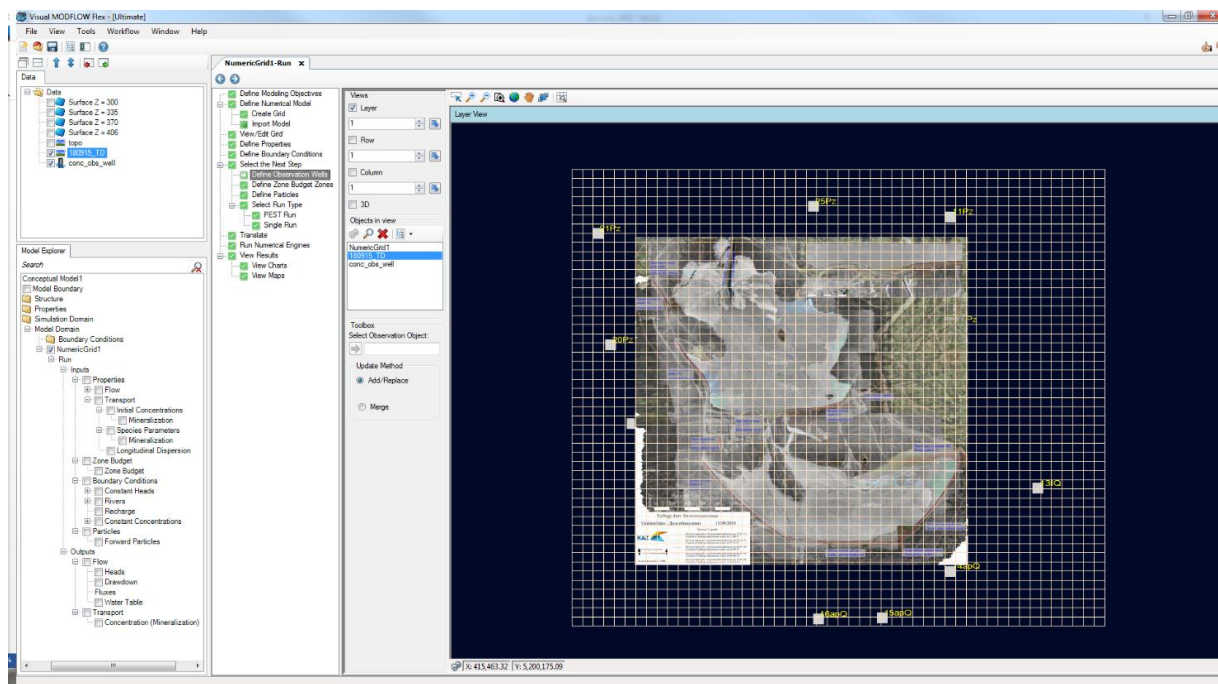


Рисунок 4.18 – Вид окна с импортированными наблюдательными скважинами

После загрузки всех необходимых данных и назначения фоновых концентраций загрязняющих веществ, мы готовы запустить решатель MN3DMS, который также требует дополнительных настроек:

- Общая пористость для опции Пористость. MT3DMS позволяет выбрать метод решения для компонента адвекции уравнения переноса. В зависимости от ситуации каждый метод решения представляет собой преимущества и недостатки. Для этого упражнения вы выберете верхнюю конечную разницу (Upstream Finite Difference), которая, основываясь на пробной ошибке, доказала, что уменьшает количество численных дисперсий;

- Метод решения в MT3DMS в древе настроек;

- Время стимуляции 1825 дней – 5 лет с начала эксплуатации хвостохранилища. Хотя, режим потока является стационарным, мы будем запускать нестационарное моделирование переноса (transient transport simulation), чтобы увидеть развитие шлейфа с течением времени. Также необходимо определить временные шаги, по истечению которых будет визуализирован результат моделирования массопереноса. Мы указали значения временных шагов с первого дня моделирования – 1 день, 30 дней, 60 дней, 180 дней, 365 дней, 730 дней и 1825 дней.

После завершения всех настроек, окно решателя MT3DMS будет выглядеть как на рисунке 4.19.

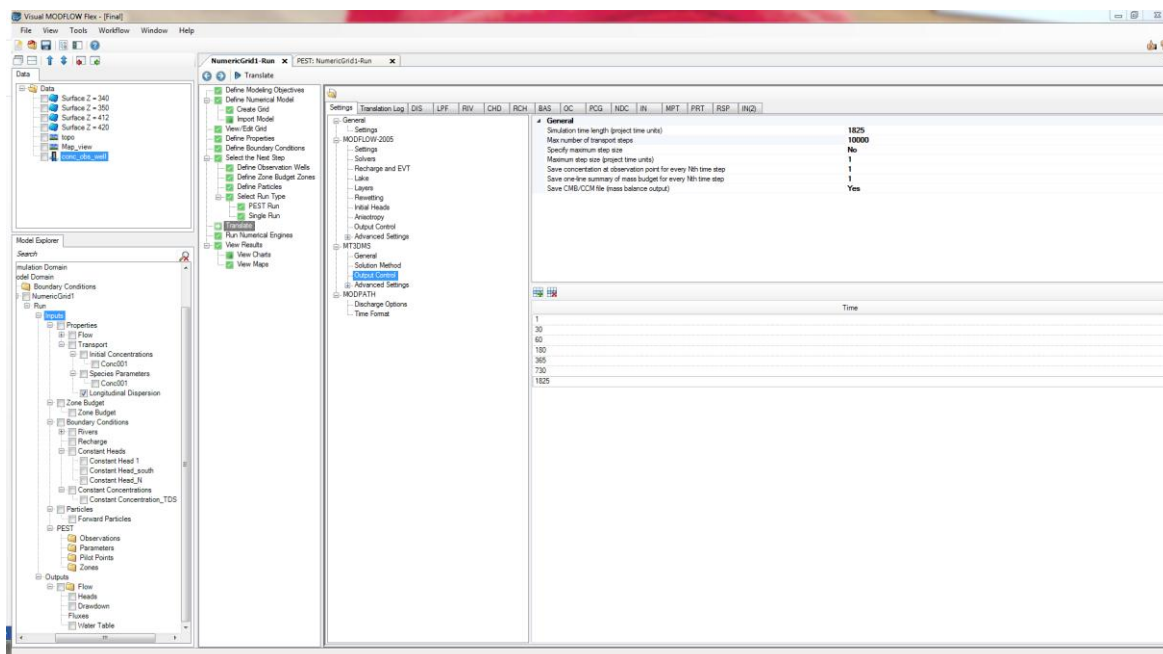


Рисунок 4.19 – Окно настроек решателя MT3DMS

Теперь мы готовы приступить к запуску движков MT3DMS и MODFLOW-2005 и перейти в режим просмотра результатов по каждому временному шагу, который был задан при настройке решателя MT3DMS. Область распространения шлейфа загрязнения подземных вод и линии контуров изменения минерализации подземных вод для каждого периода наблюдений представлены на рисунках Приложения В.

Как видно из рисунка В.7 Приложения В, область распространения шлейфа загрязнения не выходит за пределы зоны санитарной охраны и соответствует территории хвостохранилища Сульфидной фабрики. Минерализация подземных вод останется на уровне фоновых значений (500 мг/л), что еще раз подтверждает эффективность противодиффузионного слоя основания хвостохранилища.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К числу негативных последствий формирования техногенных массивов, таких как хвостохранилища, следует отнести: ухудшение состояния атмосферы, сокращение площадей земель, изменение природного ландшафта, а также гидрологического и гидрогеологического режима района [6]. Необходимой предпосылкой разработки математических моделей подземных вод в зоне действия техногенных массивов является учет физико-географических, геологических, гидрогеологических факторов, определяющих состояние и характер возможного изменения геологической среды.

Результаты настоящей магистерской диссертации подтверждают экологически безопасное складирование хвостов обогащения Сульфидной фабрики месторождения Актогай за счет эффективности существующего противодиффузионного экрана. Данный вывод был сделан путем анализа результатов производственного экологического мониторинга, доказывающего отсутствие миграции химических элементов в пределах санитарно-защитной зоны, а также на примере моделирования изменения минерализации подземных вод в зоне влияния хвостохранилища на весь период эксплуатации. Помимо глинистого грунта, слагающего геологический разрез участка хвостохранилища, роль противодиффузионного слоя играют также непроницаемые хвосты. Доказательства представлены результатами моделирования на базе модульной трехмерной программы MT3DMS, демонстрирующими сдерживание загрязняющих веществ в пределах верхнего слоя модели - непосредственно хвостами обогащения.

Вместе с тем, магистерская работа на данную тему выполнена впервые в Республике Казахстан и демонстрирует преимущества использования математических моделей массопереноса загрязняющих веществ как инструмента геохимического контроля, прогнозирования и управления состоянием окружающей среды. Результаты магистерской работы доказывают актуальность практического применения компьютерных математических моделей на аналогичных горнодобывающих предприятиях Балхашского пояса медных месторождений для решения вопросов мониторинга, защиты и рационального использования подземных вод на участках складирования хвостов обогащения медной руды.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Плотников Н.И. Техногенные изменения гидрогеологических условий. – М.: Недра, 1989.
- 2 Экологический кодекс Республики Казахстан, Глава 14, Производственный экологический контроль.
- 3 Кузнецов Д.С. Моделирование структуры потоков подземных вод в многослойных водоносных системах. – Москва, 2004.
- 4 MT3DMS: Model use, calibration and validation. - American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2012.
- 5 Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities, British Columbia, Ministry of Environment, Canada, 2012.
- 6 Техногенные массивы и охрана природных ресурсов, том 1 Насыпные и намывные массивы – М.: Издательство МГГУ, 2006.
- 7 Anderman, E. R., M. C. Hill, and E. P. Poeter. 1996. Two-dimensional advective transport in ground-water flow parameter estimation. *Ground Water* 34(6): 1001-1009.
- 8 Barlebo, H. C., M. C. Hill, D. Rosbjerg, and K. H. Jensen. 1998. Concentration data and dimensionality in groundwater models: Evaluation using inverse modeling. *Nordic Hydrol.* 29(3): 149-178.
- 9 Barlebo, H. C., M. C. Hill, and D. Rosbjerg. 2004. Investigating the macrodispersion experiment (MADE) site in Columbus, Mississippi, using a three-dimensional inverse flow and transport model. *Water Resources Res.* 40(4): W04211, doi: 10.1029/2002WR001935
- 10 Cao, G. 2011. Recharge estimation and sustainability assessment of groundwater resources in the North China Plain. Unpublished PhD diss. Tuscaloosa, Ala.: University of Alabama, Department of Geological Sciences.
- 11 Clark, M. P., D. Kavetski, and F. Fenicia. 2011. Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. *Water Resour. Res.* 47: W09301, doi: 10.1029/2010WR009827.
- 12 Clement, T. P. 1997. RT3D: A modular computer code for simulating reactive multi-species transport in 3-dimensional groundwater aquifers. Available at: <http://bioprocess.pnnl.gov/rt3d.publications.htm>. Accessed 8 January 2012.
- 13 Doherty, J. 2010. PEST User's Guide. Bethesda, Md.: S.S. Papadopoulos and Associates, Inc.
- 14 Feehley, C. E., C. Zheng, and F. J. Molz. 2000. A dual-domain mass transfer approach for modeling solute transport in heterogeneous porous media. *Res.* 36(9): 2501-2515. Foglia, L., S. W. Mehl, M. C.
- 15 Hill, P. Perona, and P. Burlando. 2007. Testing alternative ground water models using cross-validation and other methods. *Ground Water* 45(5): 627-641. *Res.* 45: W06427, doi: 10.1029/2008WR007255.
- 16 Foglia, L., S. W. Mehl., M. C. Hill, and P. Burlando. 2012. Analysis of model discrimination techniques: The case of the Maggia Valley, southern Switzerland. *Water Resour. Res.* (in review).

- 17 Goode, D. J. 1996. Direct simulation of groundwater age. *Water Resour. Res.* 32(2): 289-296.
- 18 Greskowiak, J., H. Prommer, C. Liu, V. E. A. Post, R. Ma, C. Zheng, and J. M. Zachara. 2010. *Water Resour. Res.* 46: W09509, doi: 10.1029/2009WR008781.
- 19 Halford, K. J., and R. T. Hanson. 2002. User guide for the drawdown-limited, multimode well (MNV) package for the U.S. USGS Open-File Report 02-293. Reston, Va.: U.S. Geological Survey.
- 20 Harbaugh, A. W. 2005. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model: The ground-water flow process. USGS Techniques and Methods 6-A16. Reston, Va.: U.S. Geological Survey.
- 21 Harbaugh, A. W., and M. G. McDonald. 1996. User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Reston, Va.: U.S. Geological Survey.
- 22 Harbaugh, A. W., E. R. Banta, M. C. Hill, and M. G. McDonald. 2000. MODFLOW-2000, The U.S.: U.S. Geological Survey.
- 23 Hill, M. C. 1998. Methods and guidelines for effective model calibration. USGS Water-Resources Investigations Report 98-4005. Reston, Va.: U.S. Geological Survey.
- 24 Hill, M. C. 2006. The practical use of simplicity in developing ground water models. *Ground Water* 44(6): 775-781.
- 25 Hunt, R. J., J. Doherty, and M. Tonkin. 2007. Are models too simple? Arguments for increased parameterization. *Ground Water* 45(3): 254-262.
- 26 Julian, H. E., J. M. Boggs, C. Zheng, and C. E. Feehley. 2001. Numerical simulation of a natural gradient tracer experiment for the natural attenuation study: Flow and physical transport. *Ground Water* 39(4): 534-545.
- 27 Konikow, L. F. 2011. The secret to successful solute-transport modeling. *Ground Water* 49(2):144-159.
- 28 Konikow, L. F., and J. D. Bredehoeft. 1992. Ground-water models cannot be validated. *Adv. Water Resour.* 15(1): 75-83.
- 29 Langevin, C. D., D. T. Thorne Jr., A. M. Dausman, M. C. Sukop, and W. Guo. 2007. SEAWAT version 4: U.S. Geological Survey. Available at: <http://water.usgs.gov/ogw/seawat/>. Accessed 8 January 2012.
- 30 Liu, G., C. Zheng, G. R. Tick, and S. M. Gorelick. 2010. Relative importance of dispersion and rate-limited mass transfer in highly heterogeneous porous media: *Res.* 46: W03524, doi: 10.1029/2009WR008430.







## Приложение Б

Таблица Б.1 - Сводные данные по анализам подземных вод и жидкой фазы хвостов обогащения

Показатели качества воды	ПДК	Класс опасности	Пункты опробования и значение показателя, от-до		
			скважины четвертичных отложений	скважины палеозойских пород	хвосты обогащения
Водородн.показатель	6 - 9		7.4 - 7.67	7.16 - 7.85	> 15.0
Сухой остаток, мг/л	1000		1382.0 - 9662.0	900.0 - 8270.0	810
Жесткость, мг-экв/л	7.0		14.2 - 27.4	5.5 - 28.5	3.12
Нефтепродукты, мг/л	0.1		< 0.02 - < 0.5	< 0.02 - < 0.5	0.141
ПАВ, мг/л	0.5		0.12 - 0.27	0.11 - 0.26	0.219
Алюминий, мг/л	0.5	2	< 0.04 - 0.04	< 0.04 - 0.04	0.03
Барий, мг/л	0.1	2	0.025 - 0.028	0.025 - 0.028	< 0.0020
Бериллий, мг/л	0.0002	1	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Кадмий, мг/л	0.001	2	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0010
Марганец, мг/л	0.1	3	0.010 - 0.030	0.015 - 0.036	0.022
Медь, мг/л	1.0	3	0.083 - 0.136	0.012 - 0.110	0.257
Молибден, мг/л	0.25	2	0.001 - 0.006	0.001 - 0.009	0.003
Мышьяк, мг/л	0.05	2	< 0.005 - < 0.001	< 0.005 < 0.001	0.0011
Никель, мг/л	0.1	3	0.007 - 0.018	0.005 - 0.022	0.0032
Нитраты, мг/л	45	3	10.56 - 24.73	12.83 - 24.64	20.25
Ртуть, мг/л	0.0005	1	< 0.01	< 0.01	< 0.0001
Селен, мг/л	0.01	2	< 0.002	< 0.002	<0.0001
Сульфаты, мг/л	500	4	612.0 - 2337.32	341.6 - 2390.82	574
Фториды, мг/л	1.2	2	7.87 - 8.93	7.83 - 8.72	0.57
Хлориды, мг/л	350	4	87.5 - 5390.0	161.0 - 2625.0	117
Хром (+6), мг/л	0.05	3	< 0.005 < 0.05	< 0.005 < 0.05	0.002
Цианиды, мг/л	0.035	2	< 0.01 < 0.004	< 0.01 < 0.004	0.02
Цинк, мг/л	5.0	3	0.15 - 0.33	0.18 - 0.38	0.376

Продолжение приложения Б

Таблица Б.2 – Анализ результатов операционного мониторинга подземных вод в зоне влияния хвостохранилища

Показатели качества воды	Фоновое значение показателя, от-до		Среднее значение показателя по состоянию на 2018 г	
	скважины рыхлых четвертичных отложениях	скважины коренных отложений палеозойского возраста	скважины рыхлых четвертичных отложений	скважины коренных отложений палеозойского возраста
Водородн.показатель	7.4 - 7.67	7.16 - 7.85	9.22	9.2
Сухой остаток, мг/л	1382.0 - 9662.0	900.0 - 8270.0	2066.71	1240.17
Жесткость, мг-экв/л	14.2 - 27.4	5.5 - 28.5	21.09	22.53
Нефтепродукты, мг/л	< 0.02 - < 0.5	< 0.02 - < 0.5	0.06	0.05
ПАВ, мг/л	0.12 - 0.27	0.11 - 0.26	0.23	0.2
Алюминий, мг/л	< 0.04 - 0.04	< 0.04 - 0.04	0.04	0.05
Барий, мг/л	0.025 - 0.028	0.025 - 0.028	< 0.0020	< 0.0020
Бериллий, мг/л	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Кадмий, мг/л	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0010	< 0.0010
Марганец, мг/л	0.010 - 0.030	0.015 - 0.036	0.01	0.01
Медь, мг/л	0.083 - 0.136	0.012 - 0.110	0.03	0.03
Молибден, мг/л	0.001 - 0.006	0.001 - 0.009	0.004	0.0028
Мышьяк, мг/л	< 0.005 - < 0.001	< 0.005 < 0.001	< 0.001	< 0.001
Никель, мг/л	0.007 - 0.018	0.005 - 0.022	0.01	0.01
Нитраты, мг/л	10.56 - 24.73	12.83 - 24.64	3.71	0.03
Ртуть, мг/л	< 0.01	< 0.01	< 0.0001	< 0.0001
Селен, мг/л	< 0.002	< 0.002	<0.0001	<0.0001
Сульфаты, мг/л	612.0 - 2337.32	341.6 - 2390.82	1039	833
Фториды, мг/л	7.87 - 8.93	7.83 - 8.72	0.49	0.33
Хлориды, мг/л	87.5 - 5390.0	161.0 - 2625.0	563.57	533.33
Хром (+6), мг/л	< 0.005 < 0.05	< 0.005 < 0.05	0.001	0.001
Цианиды, мг/л	< 0.01 < 0.004	< 0.01 < 0.004	< 0.01	< 0.01
Цинк, мг/л	0.15 - 0.33	0.18 - 0.38	0.22	0.23

## Приложение В

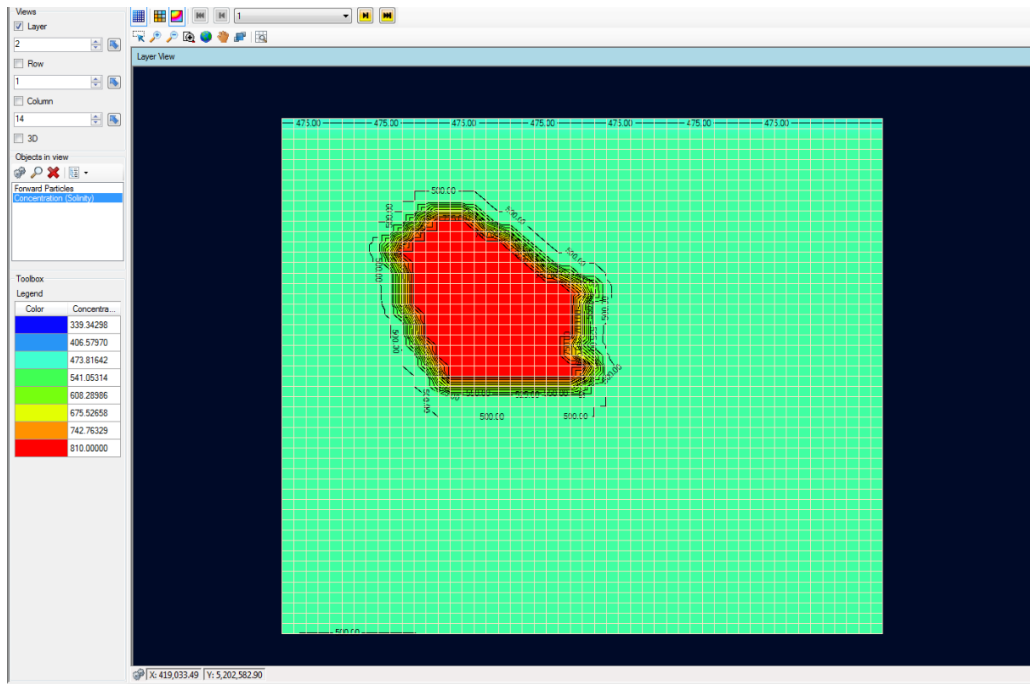


Рисунок В.1 – Распространение шлейфа загрязнения на 1 день эксплуатации хвостохранилища

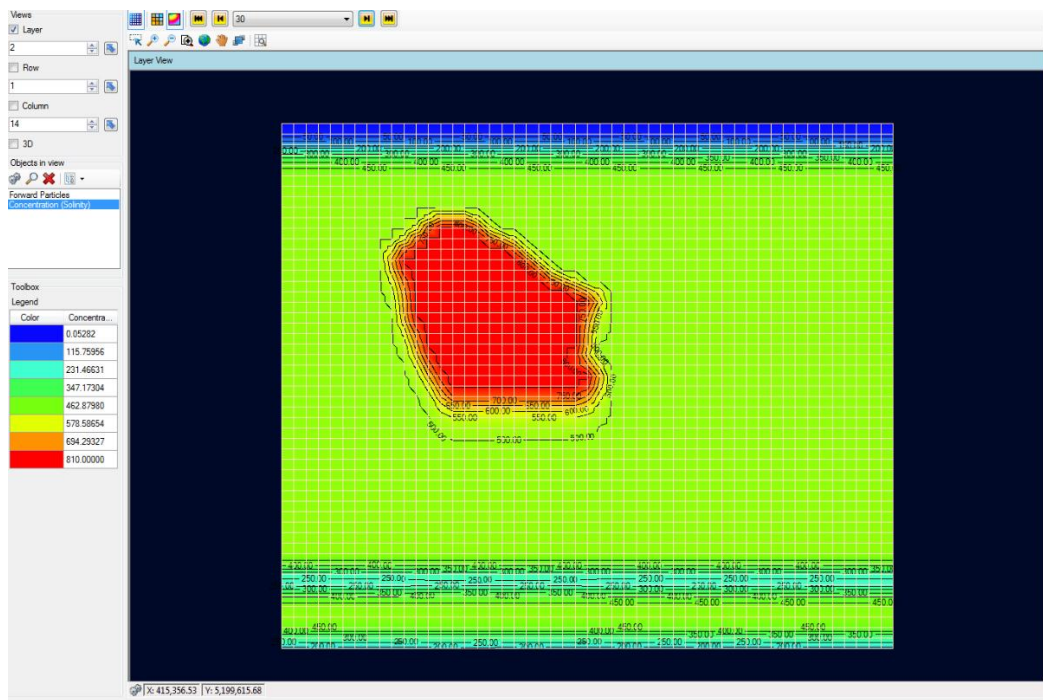


Рисунок В.2 – Распространение шлейфа загрязнения на 30 день эксплуатации хвостохранилища

## Продолжение приложения В

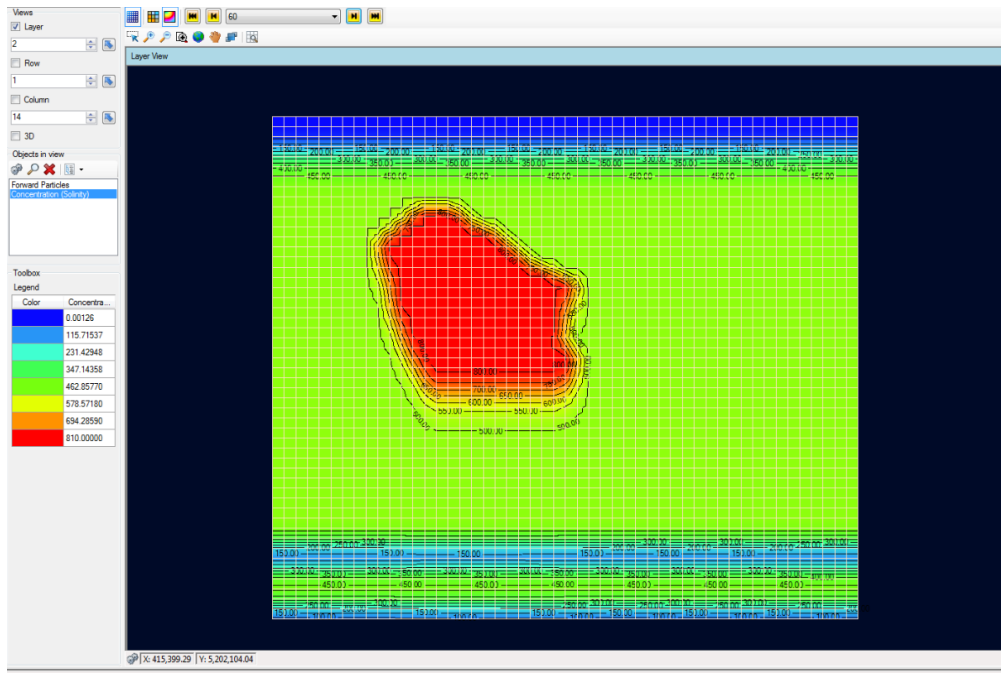


Рисунок В.3 – Распространение шлейфа загрязнения на 60 день эксплуатации хвостохранилища

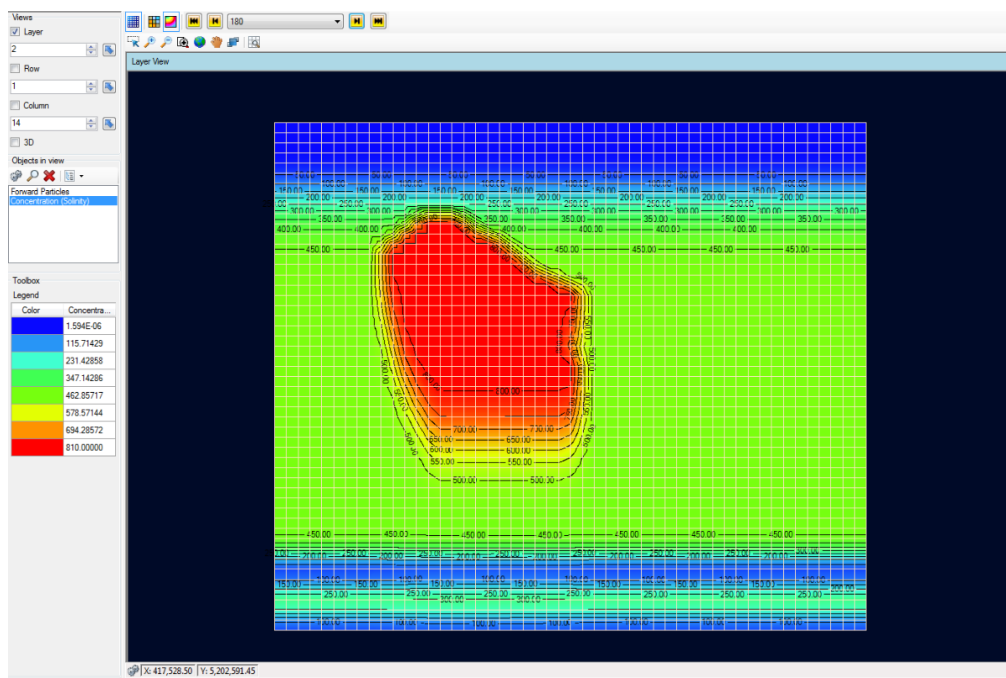


Рисунок В.4 – Распространение шлейфа загрязнения на 180 день эксплуатации хвостохранилища

## Продолжение приложения В

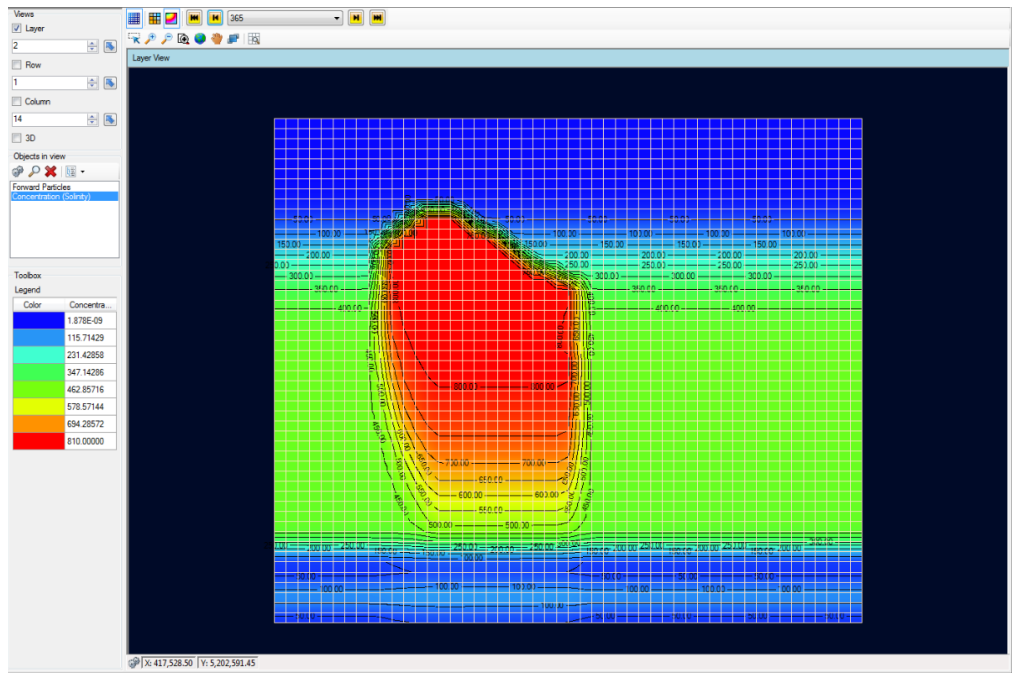


Рисунок В.5 – Распространение шлейфа загрязнения на 365 день эксплуатации хвостохранилища

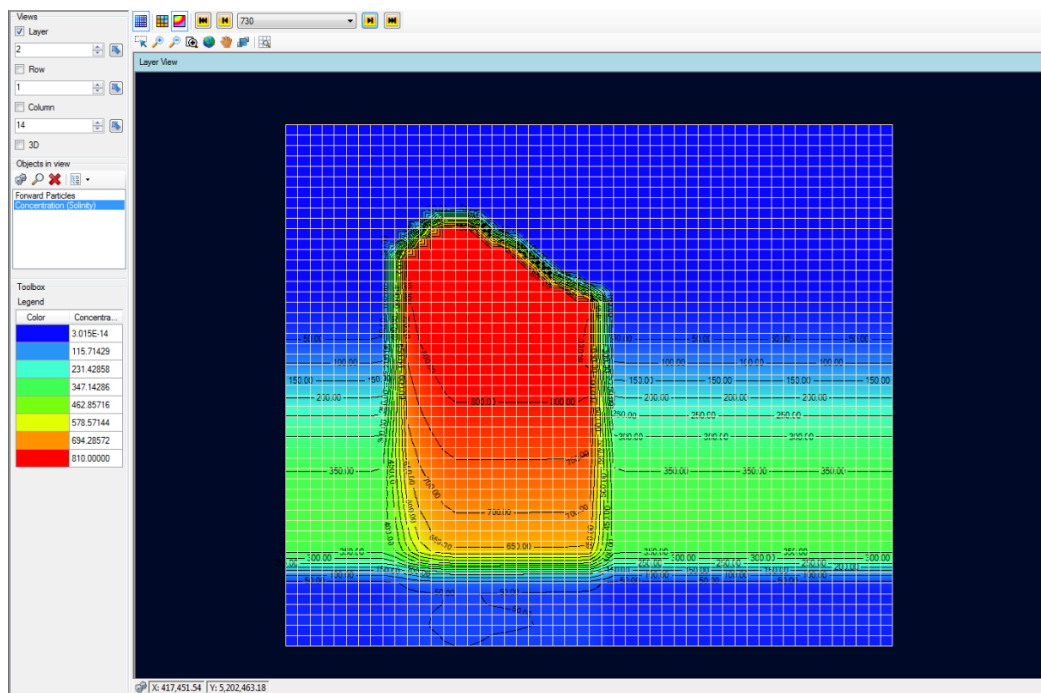


Рисунок В.6 – Распространение шлейфа загрязнения на 730 день эксплуатации хвостохранилища

## Продолжение приложения В

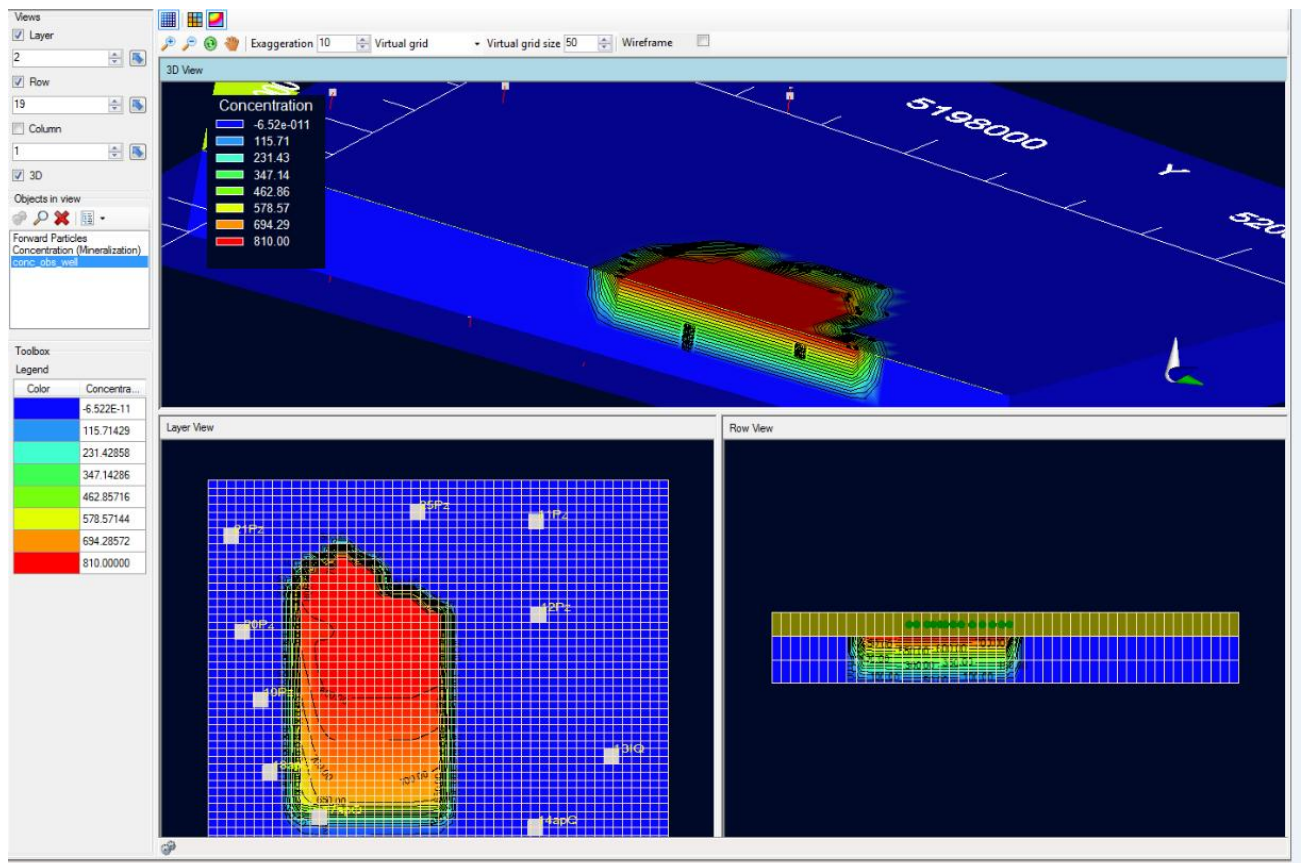


Рисунок В.7 – Распространение шлейфа загрязнения на 1825 день эксплуатации хвостохранилища в плане и разрезе