



Институт Геоэкологии им. Е.М. Сергеева
Российской Академии Наук
Санкт-Петербургское Отделение



АНСДИМАТ
www.ansdimat.com

Никуленков А.М., Румынин В.Г., Синдаловский Л.Н., Каплан Е.М.

Решение геомиграционных задач в программном комплексе АНСДИМАТ

г. Екатеринбург
2024

АНСДИМАТ – это программа для повседневных гидрогеологических расчётов

Интерпретация первичных полевых данных для определения фильтрационных и миграционных параметров водоносных пластов;

Параметрическое обоснование – это фундамент любого прогноза

Коллекция эталонных аналитических решений для типовых гидрогеологических задач;

С. Хокинг, "каждая формула в книге уменьшает количество читателей в два раза"

Инструмент для быстрого принятия проектных решений;

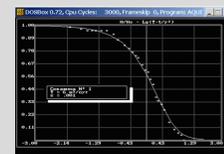
Решение любой задачи в программе АНСДИМАТ займёт не более 10 минут

Способ экспертизы гидрогеологических расчетов.

Легко посчитать и легко проверить расчеты. Программа востребована как у исполнителей работ, так и у экспертов, которые ее принимают

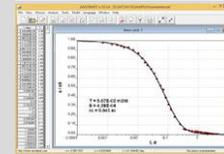
1993

Интерпретация ОФР в MS-DOS



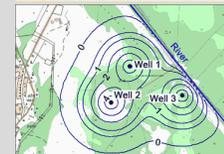
2001

Переход в Windows



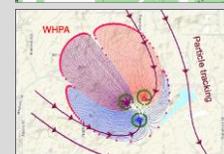
2005

Модуль аналитического моделирования



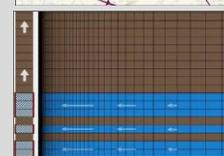
2006

Модуль ЗСО



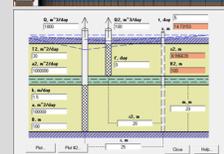
2008

Численное моделирование ОФР



2010

Калькулятор гидрогеолога



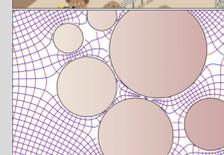
2015

Притоки в карьер



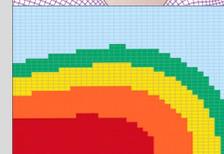
2021

Модель аналитических элементов (АЕМ)



2023

Геомиграционные расчеты



A-Conc



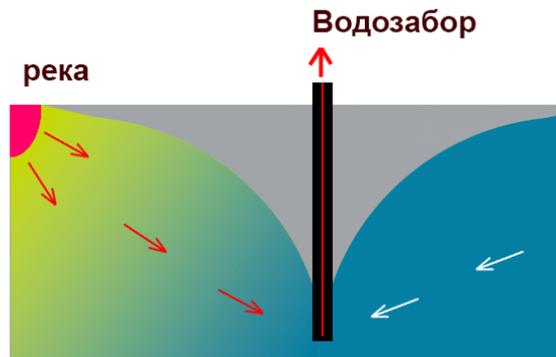
Расчет миграции загрязнения в подземных водах. Прогноз изменения качества подземных вод на водозаборах. Воздействие от полигонов ТКО. Закачка стоков в пласт. Интерпретация трассерных экспериментов.

1. Нет универсального инструмента для интерпретации полевых миграционных экспериментов
отсутствуют открытые или коммерческие коды, которые предоставляют возможность комплексной интерпретации трассерных экспериментов для различных природных условий и в различной компоновке.
2. Дефицит знаний и опыта в определении миграционных параметров в отличие от ОФР, трассерные эксперименты проводятся значительно реже. У специалистов гидрогеологов преимущественно отсутствует опыт постановки и интерпретации трассерных экспериментов.
3. Миграционные расчеты гораздо сложнее фильтрационных. Сложность заключается в обилии процессов и параметров, их контролирующих, а также сложность математическая должен быть эталон на котором можно проверить результаты миграционных расчетов выполненных, например, на численной модели.

Цель: популяризировать направление и сделать геомиграционные расчеты доступными для практического применения

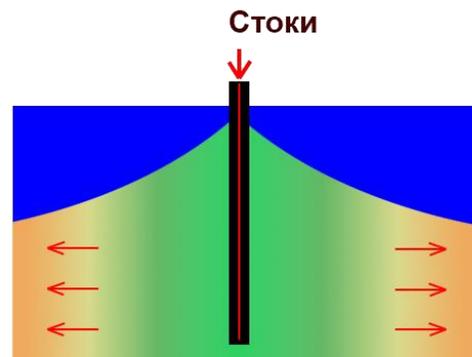
1

Изменение качества воды подземных водозаборов



2

Закачка стоков в пласты-коллекторы



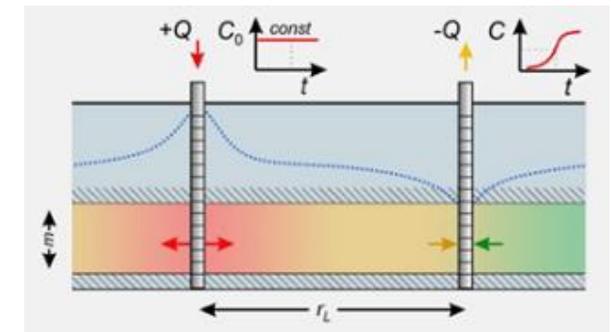
3

Плановая, профильная и 3D миграция в пласте



4

Трассерные эксперименты в водоносных пластах



- Собрано и апробировано **более 1 000 аналитических решений** для различных геомиграционных расчетов
- Разработаны авторские решения
- Систематизировано и описано более 40 реальных примеров, дана их интерпретация
- Готовится к выпуску монография *“Основы миграционных расчетов в гидрогеологии (с примерами в программном комплексе ANSDIMAT)”* Румынин В.Г., Синдаловский Л.Н., Никуленков А.М. 2025

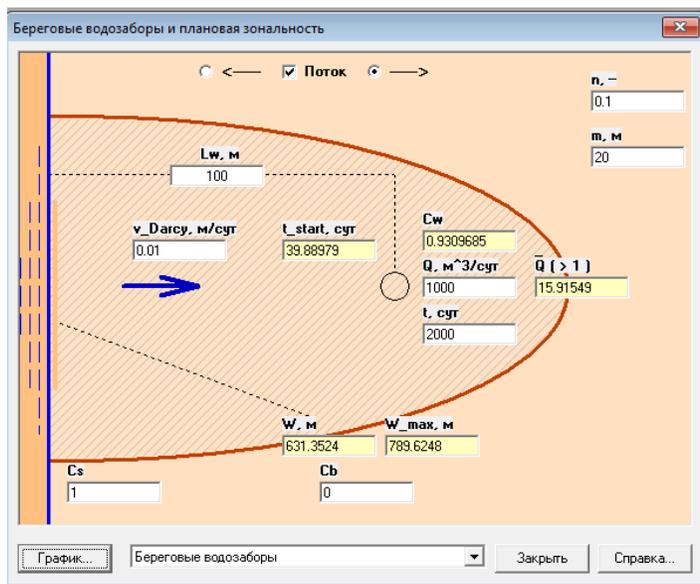
A-Cons – это справочник в котором все аналитические решения интегрированы в расчетный код. Пользователь имеет возможность погрузиться в теоретический бэкграунд, быстро сделать расчеты, подготовить отчет, ознакомиться с примерами.

Изменение качества воды подземных водозаборов. A-Comp

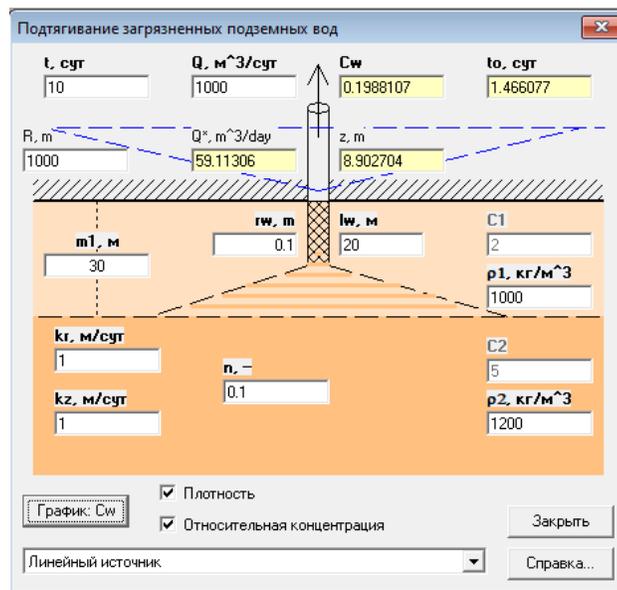
В гидрогеологической практике мы научились достаточно точно прогнозировать снижение уровней подземных вод, например, при оценке запасов. Но прогнозировать изменение качества подземных вод в процессе эксплуатации водозабора не умеем. Причина не только в сложности протекающих процессов или необоснованности исходных данных, но и в отсутствии подходящего инструмента.

В некоторых случаях прогноз не требует большого количества данных и может быть выполнен достаточно просто.

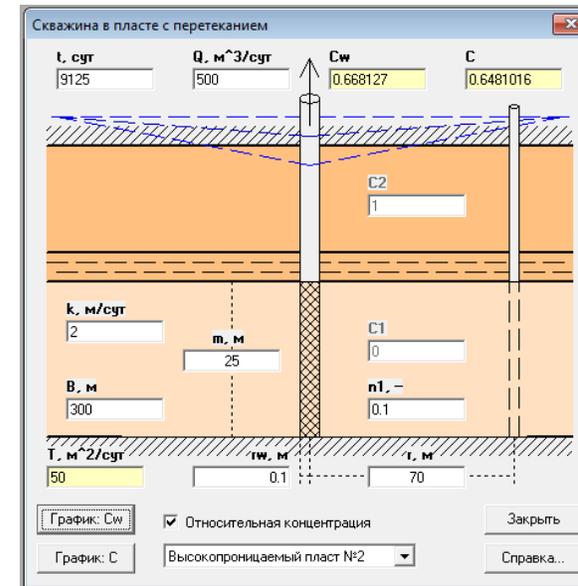
Прогноз изменения качества воды подземного водозабора во время эксплуатации за счет:



Привлечение загрязненных вод из реки к водозабору



Подтягивание линзы соленых вод

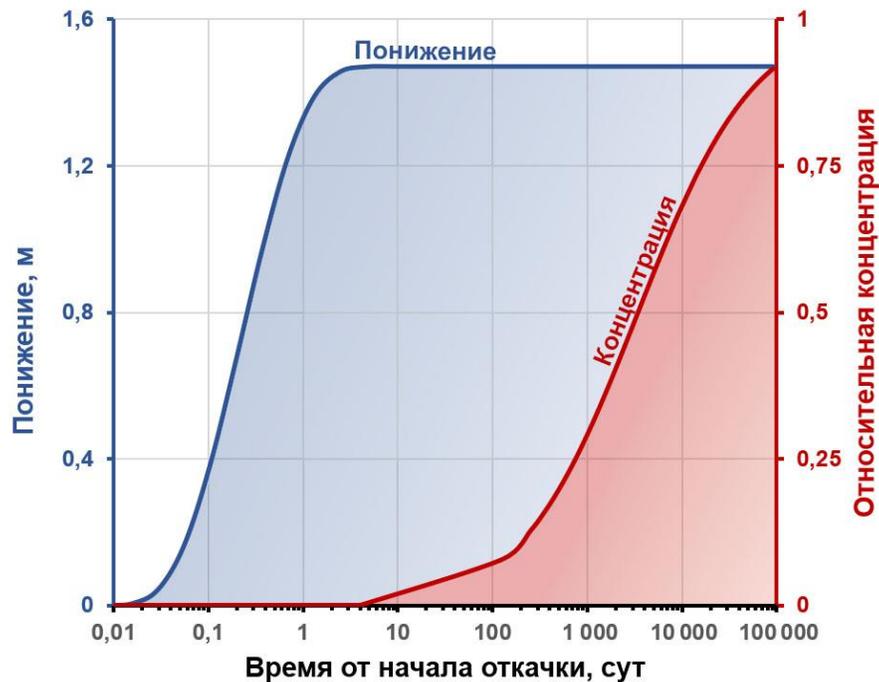


Перетекание загрязненных вод из смежного горизонта

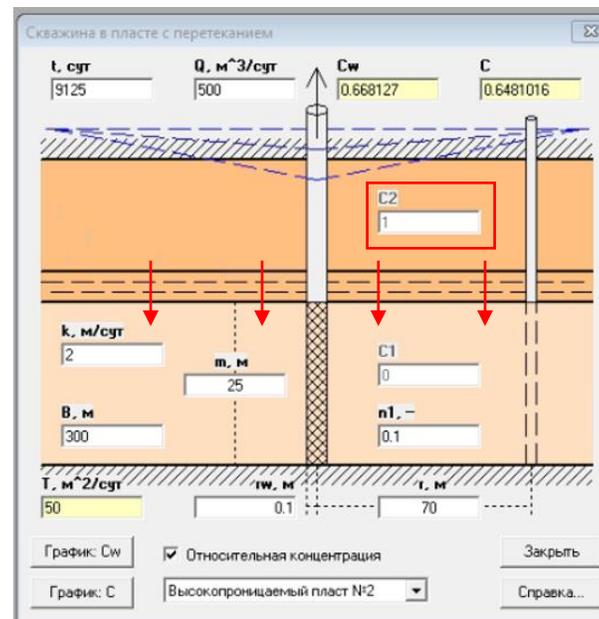
Пример 1. Прогноз изменение качества воды на подземных водозаборах

Во время откачки воды из слоистой системы может происходить подтягивание некондиционных вод из смежных водоносных горизонтов к эксплуатируемому пласту. Стабилизация уровня воды в опытной скважине происходит достаточно быстро. Однако рост концентрации в скважине за счет перетекания некондиционных вод происходит со значительной задержкой. Скорость изменения концентрации контролируется расходом. Оптимизация величины расхода может решить проблему качества питьевого водозабора расположенного в условиях перетекания.

Эволюция понижения уровня воды и концентрации в опытной скважине в условиях перетекания



Интерфейс модуля для расчета изменения качества воды водозаборной скважины



Авторское решение
Румынин В.Г., 2011

$$\bar{C} = 1 - \exp \left[-\frac{1}{B^*} \int_{r_w}^{r(t)} \frac{\tau}{v + \frac{\tau}{B^*} K_1 \left(\frac{\tau}{B^*} \right)} d\tau \right], \quad t = \frac{2\pi m_1 n_1}{Q} \int_{r_w}^{r(t)} \frac{\tau(1+v)d\tau}{\left[v + \frac{\tau}{B^*} K_1 \left(\frac{\tau}{B^*} \right) \right]}$$

$$B^* = \frac{B_1}{\sqrt{1+v}}, \quad v = \frac{T_1}{T_2}$$

Q – расход опытной скважины, м³/сут;

T_1, T_2 – проводимость основного и смежного водоносного пласта, м²/сут;

t – время добегания частицы от произвольной точки до опытной скважины, сут;

$B_1 = \sqrt{T_1 \frac{m'}{k'}}$ – параметр перетекания, м;

m_1 – мощность основного пласта, м;

k' – коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя, м/сут;

m' – мощность слабопроницаемого слоя, м;

n_1 – активная пористость основного пласта;

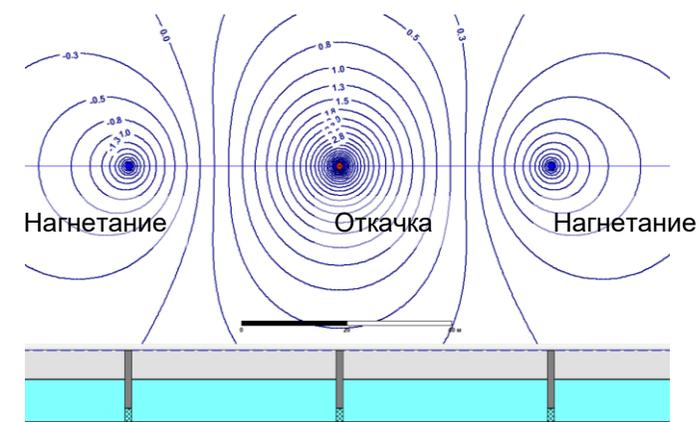
r_w – радиус опытной скважины, м;

$r(t)$ – расстояние, которое проходит частица от произвольной точки до опытной скважины за время t

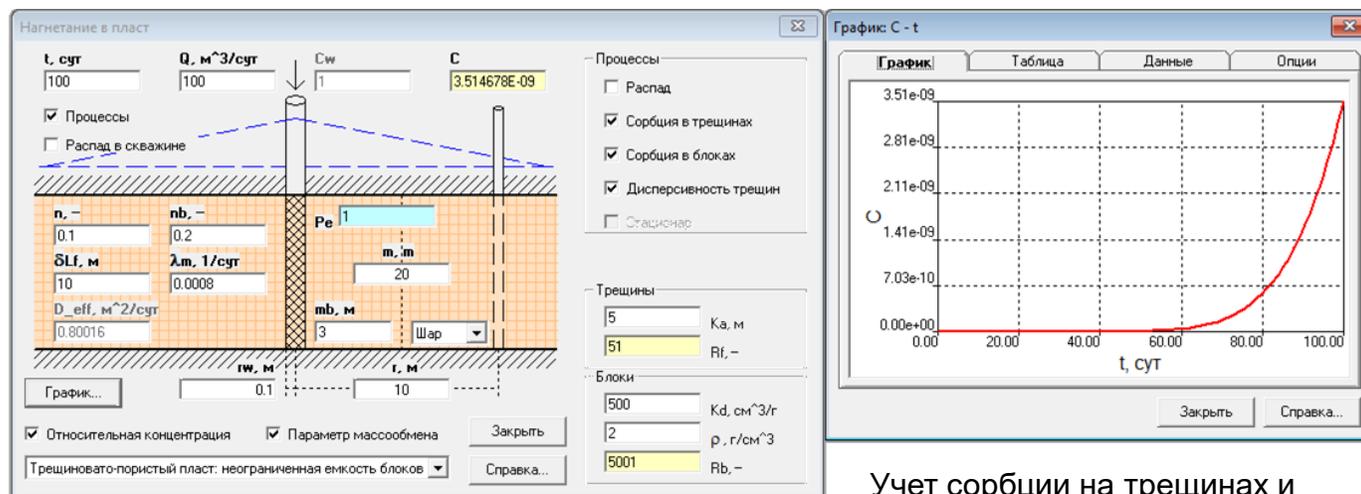
Программа АНСДИМАТ позволяет:

- Рассчитать давления на устье закачных скважин
- Подобрать оптимальный режим закачки
- Оптимизировать положение (повысить эффективность) закачных и откачивающих скважин
- Рассчитать скорость распространения стоков в пласте и их концентрацию

Система нагнетательных и откачивающих скважин для ПВ урана.

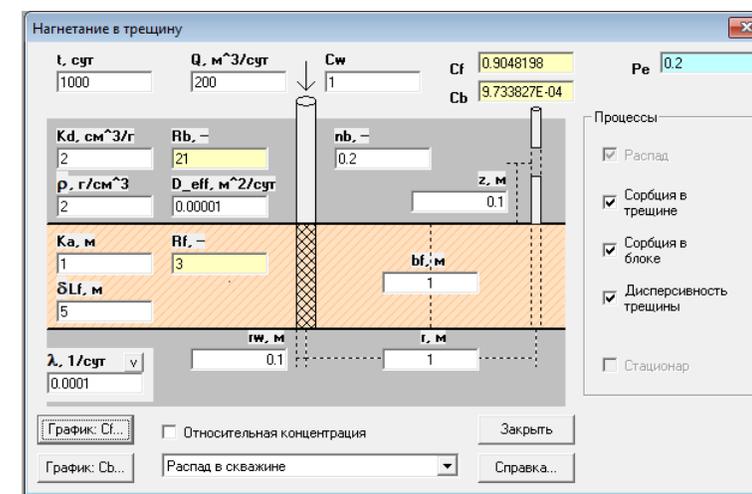


Нагнетание в трещиновато-пористый пласт

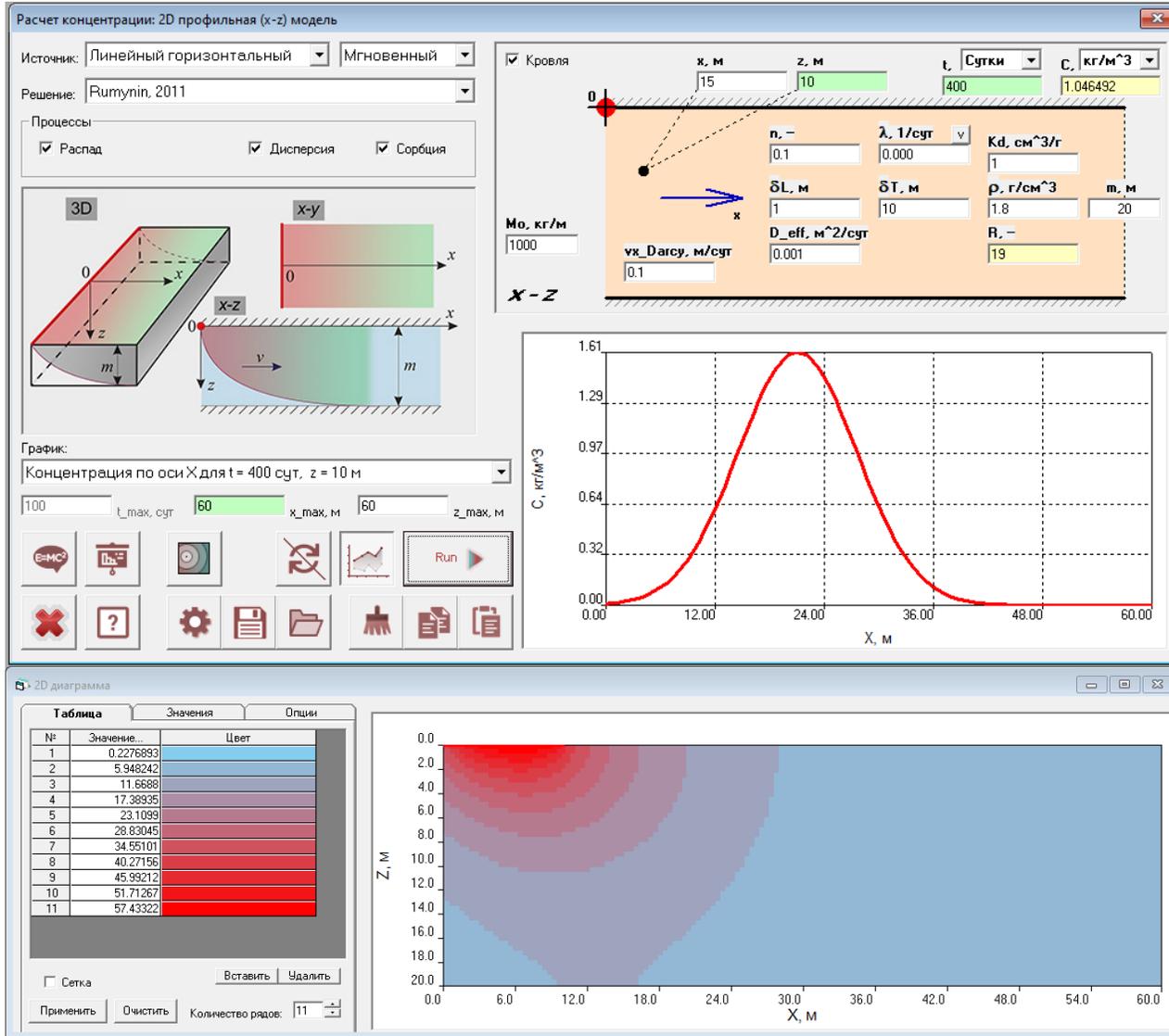


Учет сорбции на трещинах и блоках, обмен массы с блоками

Нагнетание в трещину / разлом



Моделирование миграции в пласте от источника загрязнения до зоны разгрузки



Среды:

Пористые / трещиновато-пористые / трещиноватые

Процессы:

конвекция

дисперсия (постоянная / зависящая от масштаба ореола)

сорбция (линейная / нелинейная / равновесная / неравновесная)

распад (в источнике / в пласте)

двойная пористость (сорбция в блоке / трещине / удельная поверхность блоков / диффузия в блок)

коллоидный перенос (концентрация коллоидов / сорбция на коллоиде / сорбция коллоидов на породе)

Источник:

Характер: постоянный / импульсный / переменный

Форма: точечный / линейный / площадной / объемный

Граничные условия:

Входная граница: I род, III род

Выходная граница: II род ($x=L$), ($x = \infty$)

Карта с отходами

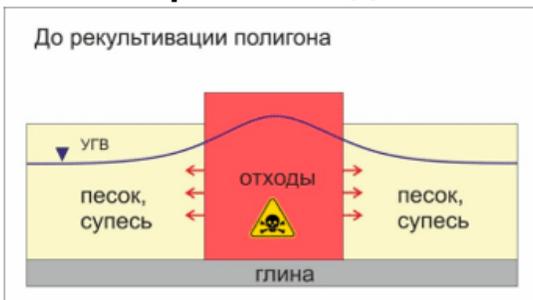


Схема к расчету



Концентрация в точке x на момент времени t :

$$C(x, t) = C_1 + (C_0 - C_1)A(x, t),$$

$$A(x, t) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Rx - ut}{\sqrt{4D_x Rt}} \right) + \exp \left(\frac{ux}{D_x} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{Rx + ut}{\sqrt{4D_x Rt}} \right) + 2 + \frac{u(2L - x)}{D_x} + \frac{u^2 t}{D_x R} \exp \left(\frac{uL}{D_x} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{R(2L - x) + ut}{\sqrt{4D_x Rt}} \right] - \frac{\sqrt{4u^2 t}}{\sqrt{\pi D_x R}} \exp \left[\frac{uL}{D_x} - \frac{R}{4D_x t} \left(2L - x + \frac{ut}{R} \right)^2 \right] \right]$$

где
 C_0 – начальная концентрация, мг/л;
 C_1 – граничная концентрация, мг/л;
 $C(x, t)$ – расчетная концентрация, мг/л;
 D – поровая дисперсия, м²/сут;
 D_e – эффективный коэффициент молекулярной диффузии, м²/сут;
 D_p – поровый коэффициент молекулярной диффузии, м²/сут;
 K_d – коэффициент сорбционного распределения, г/см³;
 L – расстояние от источника загрязнения до границы, м;
 n – активная пористость, –;
 R – фактор задержки, –;
 t – время от начала загрязнения, сут;
 u – действительная скорость фильтрации, м/сут;
 v – скорость фильтрации Дарси, м/сут;
 x – расстояние от источника загрязнения, м;
 ρ_s – плотность породы в сухом состоянии, см³/г;
 δ_L – продольная дисперсивность, м.

$$u = \frac{v}{n}, \quad R = 1 + \frac{\rho_s \cdot K_d}{n}, \quad D = \frac{\delta_L v + D_{ef}}{n} = \delta_L u + D_p, \quad D_{ef} = nD_p,$$

При **изоляции опасных отходов в геологической среде**, рекультивации полигонов промышленных и бытовых отходов применяются инженерные барьеры (ПФЗ, мембраны и т.д.). Они предназначены для локализации очага и сдерживания выхода загрязнения в окружающую среду.

Одной из актуальных задач является обоснование толщины барьера и его свойств.

В программе АНСДИМАТ можно рассчитать **скорость проникновения загрязнения в барьер** и его **удерживающую способность**.

Расчет глубины проникновения загрязнения в глинистый барьер



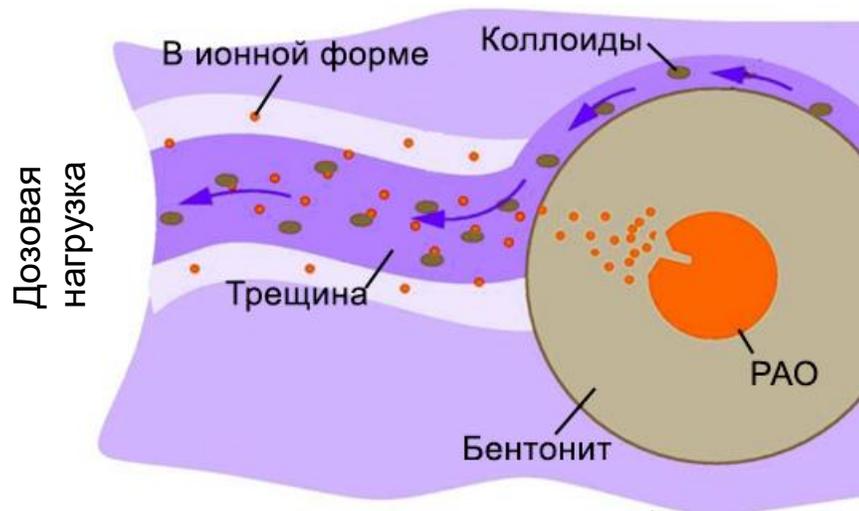
Учитываемые процессы:

- Конвекция
- Дисперсия / диффузия
- Сорбция

Таблица 1. Фильтрационные и миграционные параметры глиняного барьера

п.п.	Параметр барьера	Величина	Размерность
1	Коэффициент фильтрации, k	1E-6	м/сут
2	Эффективный коэффициент молекулярной диффузии, D_e	3E-6	м ² /сут
3	Активная пористость, n_a	0.1	м ³ /м ³
4	Линейный коэффициент сорбционного распределения, K_d	0.2	см ³ /г
5	Плотность сух. грунта, ρ_s	1.7	г/см ³
6	Дисперсивность, δ_L	0.01	м
7	Продолжительность изоляции	1000	лет

Разработана модель коллоидного переноса



Наиболее опасные радионуклиды (Am, Pu) как правило хорошо сорбируются на горных породах. Это приводит к тому, что их скорости миграции в водоносных горизонтах очень и очень низкие (радионуклиды локализируются вблизи своего источника).

Однако, на некоторых объектах было инструментально зафиксировано, что сильно сорбируемые радионуклиды могут мигрировать от источника на большие расстояния со скоростями, сопоставимыми с миграцией инертного трассера.

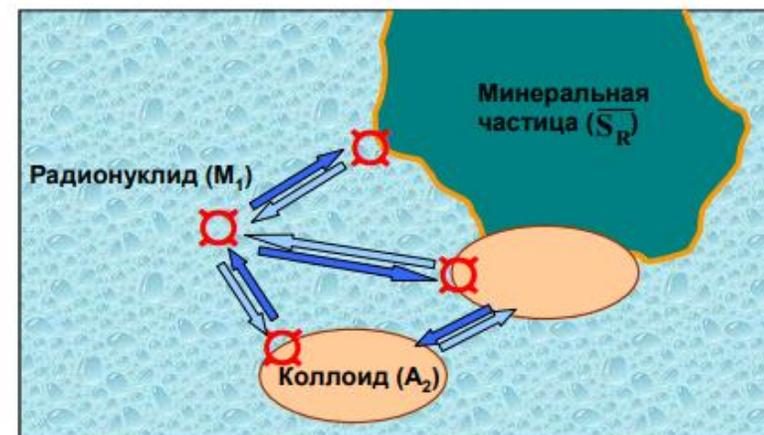
Причины **быстрого транспорта** хорошо сорбируемых радионуклидов в водоносном пласте – это **коллоидный транспорт**. Радионуклид сорбируется на коллоидной частице и далее “бежит на ней” как инертный трассер.

Источники коллоидов:

1. Техногенный (глинистые инженерные барьеры, металлические конструкции и т.д.)
2. Природный (формирование глинистых минералов за счет растворения породообразующих минералов / полимеризация комплексных соединений)

Процессы и параметры:

Сорбция/десорбция на коллоиде,
Сорбция коллоида на породе
Концентрация коллоидов
Количество коллоидных фаз

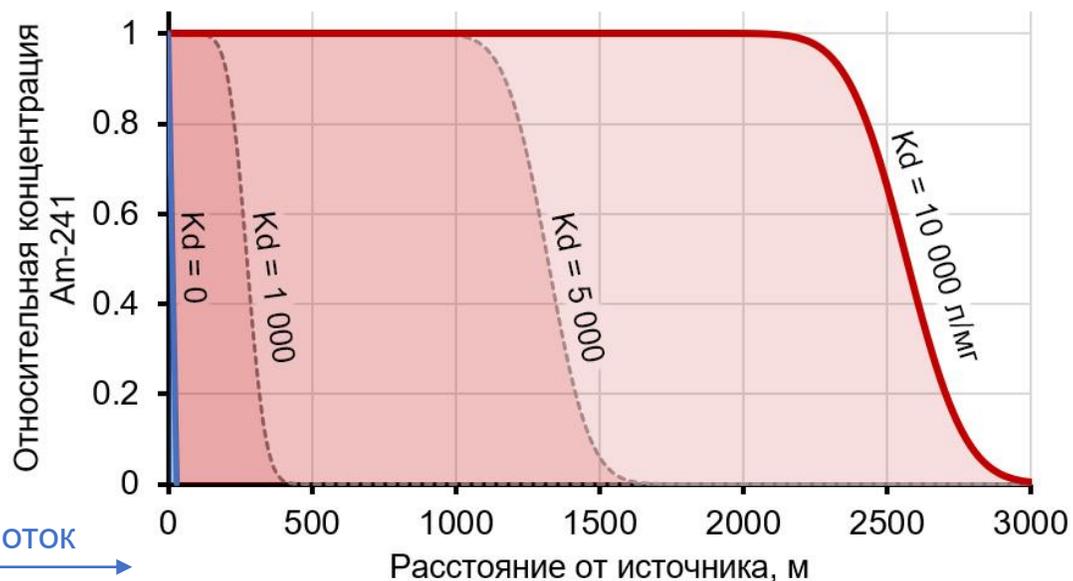


Произведен расчет миграции **Am-241** в подземных водах в присутствии коллоидов. Было показано, что степень ускорения миграции Am-241 в пласте зависит от величины сорбции (K_d) радионуклида на коллоиде. При высоких K_d на коллоиде ускорение с коллоидами достигает до 100 000 раз!. По мере снижения сорбции Am на коллоидах влияние коллоидов уменьшается.

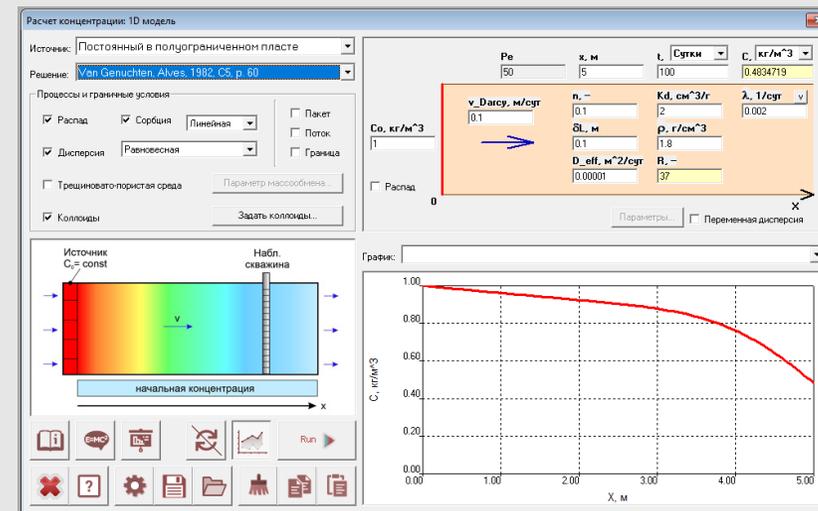
Разработано решение для оценки степени ускорения фронта загрязнения в зависимости от K_d и концентрации коллоидов.

Ускорение миграции Am в присутствии коллоидов

ИББ: Кантатский каолин. Радионуклид: Am-241. Коллоиды: 10 мг/л



Интерфейс модуля для расчета коллоидного переноса



Авторское решение. Румынин В.Г., 2011

Эффективный фактор задержки в присутствии коллоидов

$$R_c = \frac{R_1 + \sum_{i=2}^{N+1} [K_{li} + K_{li}^S (R_i - 1)] C_i^T}{1 + \sum_{i=2}^n K_{li} C_i^T},$$

$$R_1 = 1 + \frac{\bar{K}_i}{n}, \quad \bar{K}_i = \rho_b K_{di},$$

$$C_c^T = \sum_{i=2}^{n+1} C_i^T, \quad f_i = \frac{C_i^T}{C_c^T} 100,$$

где

C_c^T – суммарная концентрация коллоидов по всем фазам, мг/л;

C_i^T – концентрация i -й коллоидной фазы, мг/л;

f_i – процентное содержание i -й коллоидной фазы, %;

K_{di} – коэффициент сорбционного распределения i -го коллоида, см³/г;

\bar{K}_i – безразмерная величина, отвечающая за сорбцию чистого i -го коллоида;

K_{li} – сорбция загрязняющего компонента на i -м коллоиде, л/мг;

K_{li}^S – сорбция загрязненного i -го коллоида на породе, л/мг;

N – количество коллоидных фаз;

n – активная пористость, –;

$R_1 = R$ – фактор задержки при отсутствии коллоидов, –;

R_c – расчетный фактор задержки; эффективный параметр, который используется в расчетах концентрации при наличии коллоидов вместо R , –;

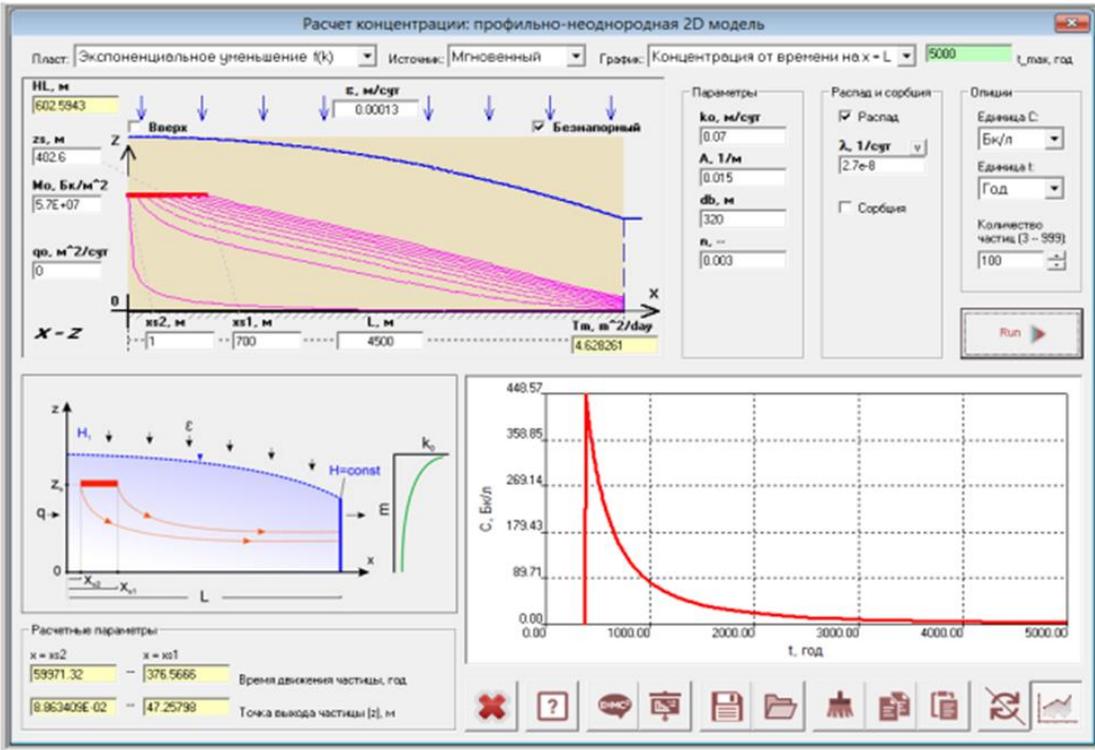
R_i – фактор задержки чистого i -го коллоида, –.

Пример 4. Влияние гипсометрического положения интервала захоронения РАО

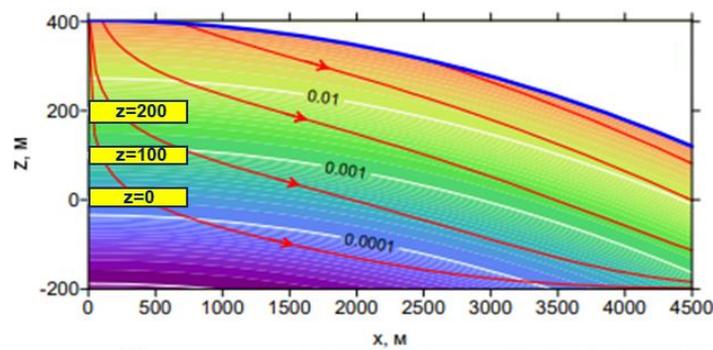
Кристаллические трещиноватые массивы имеют **тенденцию к затуханию проницаемости** с глубиной. В таких условиях **глубина** расположения горной выработки для изоляции радиоактивных отходов **определяет время миграции** от источника до зоны разгрузки, т.е. долговременную безопасность.

Было показано, что **погружение выработки** на каждые 100 м **приводит к увеличению в 3 раза времени миграции** до зоны разгрузки и одновременно снижает концентрации радионуклидов в подземных водах.

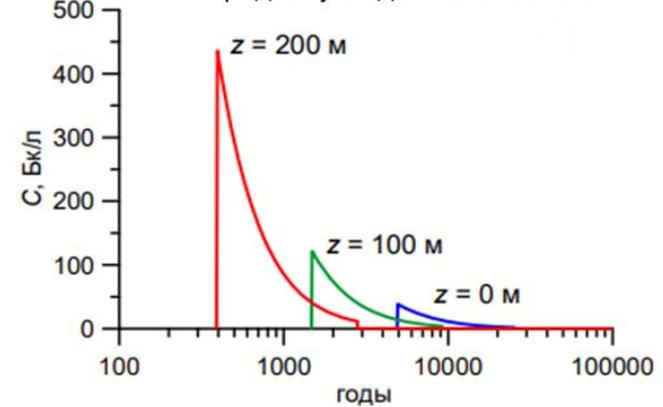
Интерфейс для задания параметров миграции в профильно-неоднородном пласте



Профиль проницаемости и положение источника



Концентрация в зоне разгрузки после выхода радионуклидов из источника



Авторское решение
Rumynin et. al.,
2021



Безнапорный водоносный горизонт

$$v_x(x, z) = -R \frac{T_1 + (L-x+q_0/R) \partial T_1 / \partial x}{T_1^2} \int_0^z k(z) dz$$

$$v_z = -k(z) R \frac{L-x+q_0}{T_1} (\leq 0) \quad T_1 = T(x) = \int_0^x k(z) dz$$

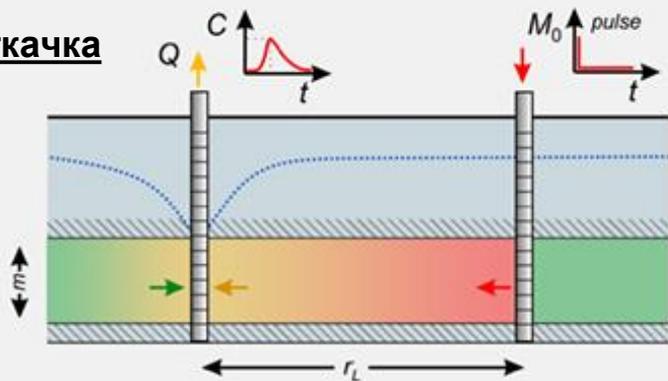
Уравнение линий тока

$$\int_{x_0}^x \frac{k(z) dz}{k(\xi) d\xi} = \ln \frac{L+q_0-x_0}{L+q_0-x} + \int_{x_0}^x \frac{1}{T_1} \frac{\partial T_1(x)}{\partial x} dx$$

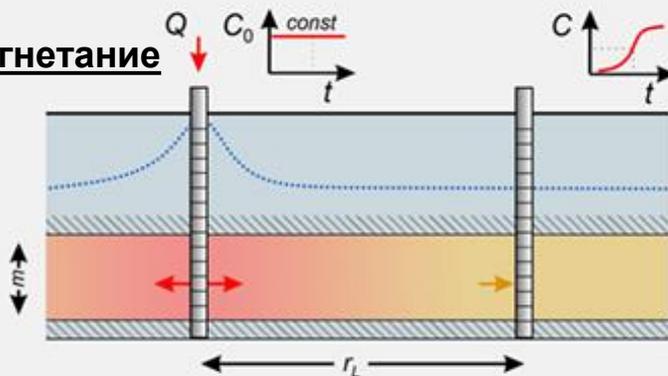
Уравнение для времени миграции частиц

$$t = -\frac{nR_0}{R} \int_{x_0}^x \frac{T_1 dx}{k(z(x))(L+q_0-x)}$$

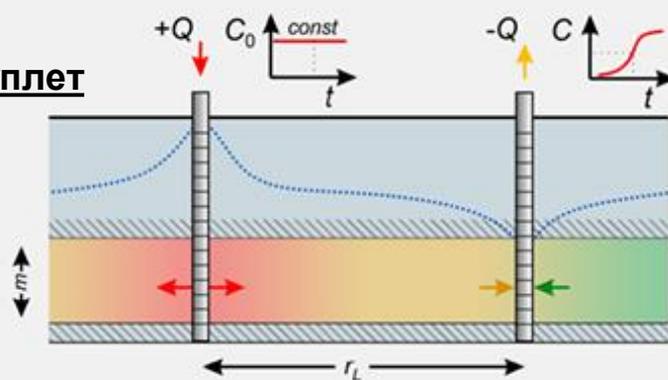
Откачка



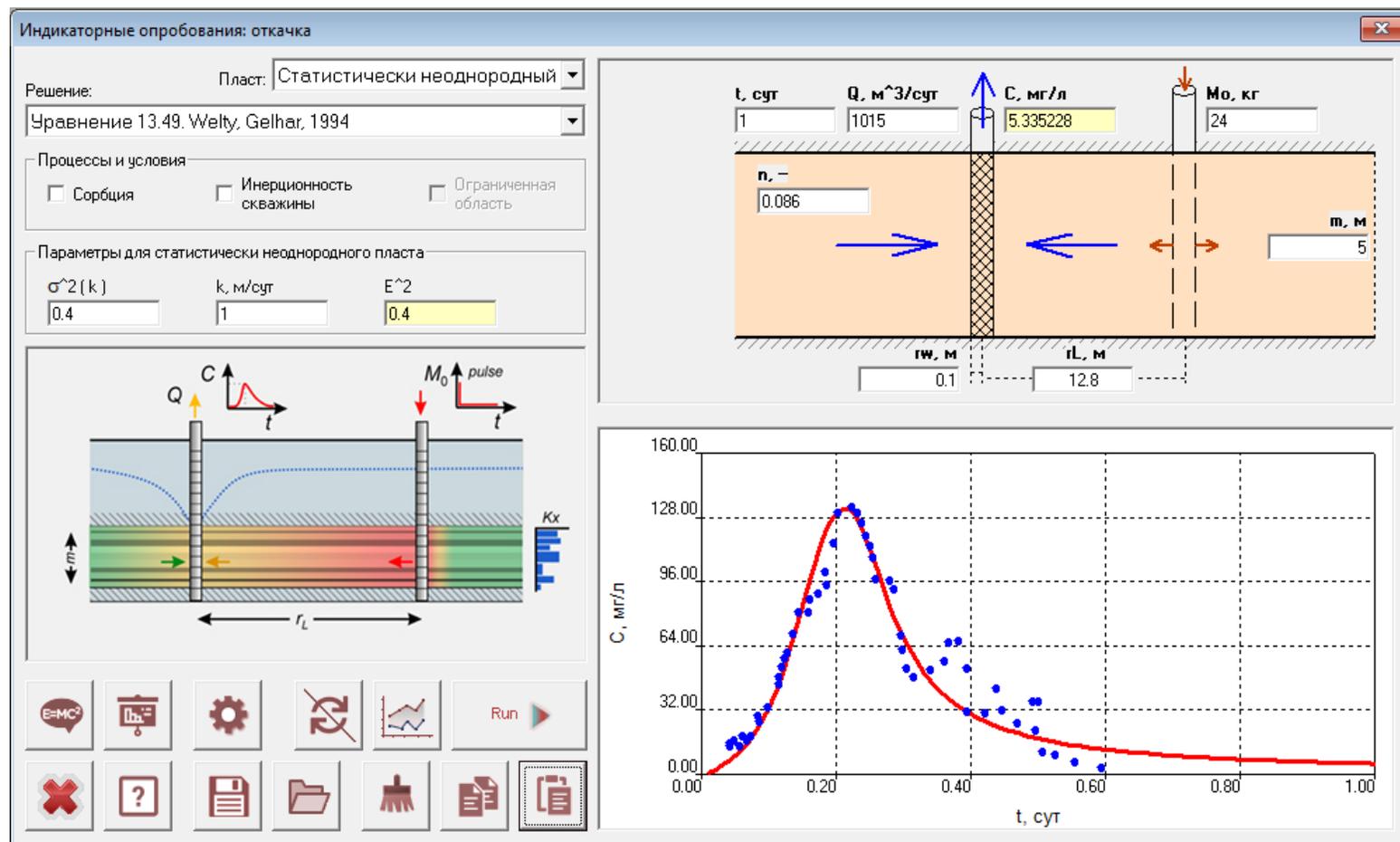
Нагнетание



Дуплет



Схемы проведения эксперимента: откачка, нагнетание, дуплет;
Источник: постоянный, импульсный, пакет;
Среда: гомогенная, стат. неоднородная, трещиновато-пористая;
Процессы: инерционность скважины, конвекция, дисперсия, сорбция, обмен между трещинами и блоками.



Пример 5. Эксперименты с химическим и тепловым трассером

При миграции в трещиновато-пористых средах существенную роль играют параметры массообмена между трещиной и блоками. Однако, определить их в стандартных условиях миграционного эксперимента крайне затруднительно. Все из-за того, что диффузионные процессы в блок очень медленные и начинают проявляться только на больших временах (обычно не доступных для трассерного эксперимента).

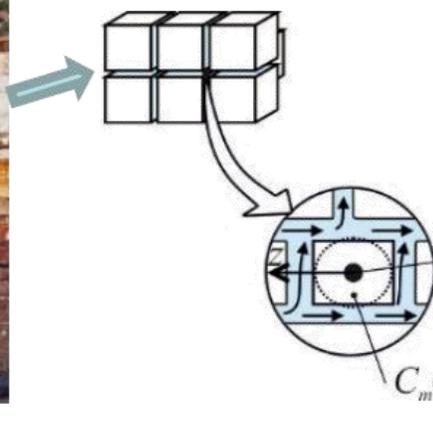
Существует физическая аналогия между процессами массо- теплообмена с той лишь разницей, что температуропроводность горных пород на 2-3 порядка выше коэффициента диффузии солевого трассера.

Этим свойством можно воспользоваться для того, чтобы “ускорить” трассерный эксперимент и определить параметры блочной среды (удельную поверхность блоков S_b) в обозримые сроки полевого эксперимента.

Трещиновато-пористая среда



Блоки и трещины



Массообмен

$$\lambda_m = \frac{S_b^2 D_{eff}}{n_b}$$

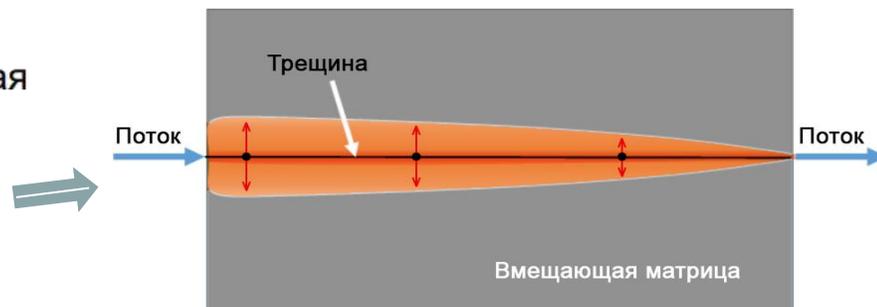
Теплообмен

$$\lambda_m \rightarrow \lambda_T = S_b^2 a_b$$

S_b – удельная поверхность блоков

a_b – коэффициент температуропроводности блоков

D_{eff} – эффективный коэффициент молекулярной диффузии

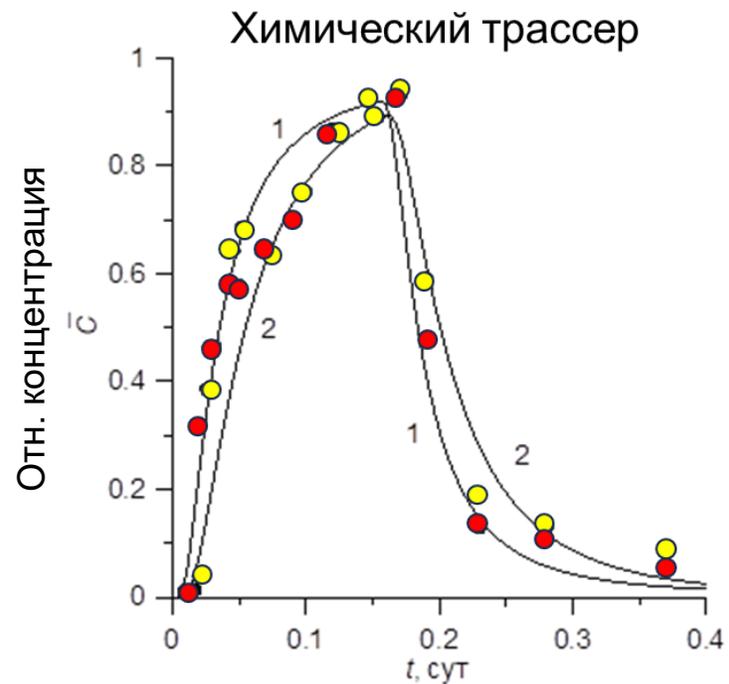
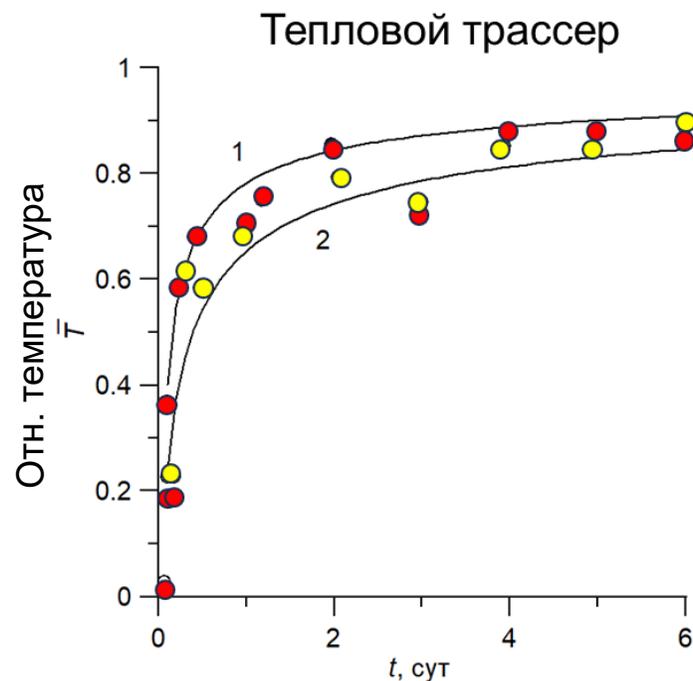


Пример 5. Эксперименты с химическим и тепловым трассером

Скважины располагались на опытно-методическом полигоне ВСЕГИНГЕО «Петушки». Закачка проводилась в трещиноватые породы подольско-мячковского горизонта с расходом 2120 м³/сут. В качестве химического трассера-красителя использовался флюоресцеин. Источником воды и одновременно тепловым трассером служила подземная вода, отбираемая из нижерасположенного горизонта, температура которой превышала на 1.1–1.2 С температуру опробуемого горизонта.

По тепловому трассеру была оценена поверхность блоков S_b , а по химическому пористость трещин/блоков, дисперсия и массообменный параметр.

Регистрация трассера в наблюдательной скважине на расстоянии 15 м от источника



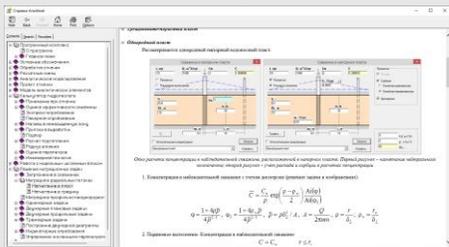
Параметры	Варианты	Химический	Тепловой
Подобранные параметры: операционное решение (14.26)			
n	1	0.003	0.003
	2	0.005	0.003
δ_L , м	1, 2	3	3
λ_m , сут ⁻¹	1	4.17E-06	
	2	1.04E-06	
λ_T , сут ⁻¹	1		0.012
	2		0.004
Лабораторные данные			
n_m	1, 2	0.2	
n_T	1, 2		0.48
D_{mp}^* , м ² /сут	1, 2	2.7·10 ⁻⁵	
a_b^* , м ² /сут	1, 2		9·10 ⁻²
$S_b = (\lambda_m / D_{mp})^{1/2}$ $S_b = (\lambda_T / a_b)^{1/2}$			
S_b , м ⁻¹ **)	1	0.4	0.4
	2	0.2	0.2

Аналитическое моделирование в вычислительной среде ANSDIMAT позволяет:

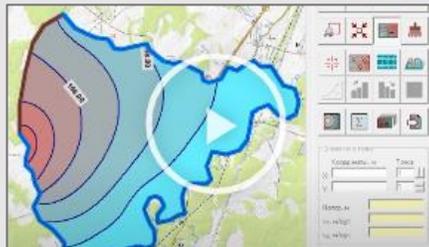
- Сделать доступным для пользователя решение практических геомиграционных задач
- Оценить значимость различных миграционных механизмов при их взаимно наложении при прогнозировании, т.е. выполнить анализ чувствительности
- Исключить влияние численной дисперсии на сеточных моделях на результаты прогноза
- Дополнить курсы учебных дисциплин в вузах

Справочные материалы

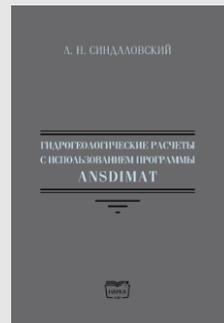
Справка



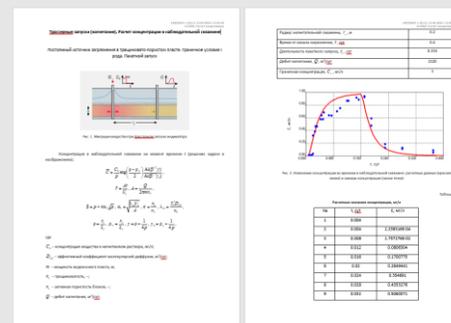
Видеоуроки



Монографии



Отчеты



Поддержка пользователей

- Онлайн консультации
- Аудит готовых проектов
- Адаптация модуля под запросы пользователей

24/7

Спасибо за внимание!

annik@hgepro.ru

