

# О ВОЗМОЖНОСТЯХ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ МИГРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSDIMAT

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

Международная научная конференция «Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования», посвященная 70-летием кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

17-23 сентября 2023 г.

г. Сочи

# Линейка программ ANSDIMAT развивается с 1993 г.





### Включен в реестры:

- Российского программного обеспечения;
- Перечень российского программного обеспечения для субъектов градостроительной деятельности.

Используется в 53 университетах по всему миру



Внедрение более чем в 700 организациях в 28 странах Л.Н. Синдаловский: Премия Российской академии наук имени Ф.П. Саваренского (2022 г.) https://ru.wikipedia.org/wiki/Премия\_имени\_Ф.\_П.\_Саваренского



Был рекомендован для применения на объектах ГК «Росатом» http://www.atomic-energy.ru/news/2014/11/05/52632



Получил положительное заключение **Министерства здравоохранения РФ** о соответствии программного комплекса требованиям законодательства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия человека http://ansdimat.com/download/Exp\_zakl\_Sysin.pdf





Интерпретация ОФР



Оценка запасов Подземных вод



Расчет границ ЗСО



Расчеты притоков в горные выработки



Сеточная модель откачки



Быстрые гидрогеологические расчеты



2D моделирование потоков методом AEM



Аналитические решения миграционных задач





Solute transport in porous media using analytical solutions of the convection-dispersion solute transport equation

SEPA BIOCHLOR, REMChlor

Natural Attenuation Decision Support System



Tracer-test interpretation for porous environments



Програм

S.S. Papadopulos & Associates, Inc. software





Введение (историческая справка)

# Задачи

- Очертить круг гидрогеологических условий, в которых аналитические расчеты могу эффективно дополнять численное моделирование, а в некоторых случаях, быть его конкурентом
- Представить малоизвестные и/или оригинальные аналитические модели
- Проиллюстрировать эффективность разрабатываемого инструмента на примерах из гидрогеологической практики
- Выводы
- Планы на дальнейшее развитие модельного комплекса

# Программные разработки, основанные на аналитических решения уравнений миграции вещества в подземных водах (ADE software)

| Название кода (Software)  | Авторы  | Организация, страна  |  |  |  |  |
|---|---|--|--|--|--|--|
| 1D равновесная сорбция, кинетика нулевого и первого порядка                         |   |  |  |  |  |  |
| CFITM   | Van Genuchten, 1980<br>Van Genuchten, Alves, 1982   | USDA, Salinity Laboratory  |  |  |  |  |
| <mark>3D дис</mark>   | персия, равновесная сорбци  | я, распад  |  |  |  |  |
| Domenico Model  | Domenico, 1987  | Texas A&M University   |  |  |  |  |
| AT123D  | Yeh 1981  | Oak Ridge National Laboratory  |  |  |  |  |
| ATRANS  | Neville, 1998   | SS Papadopulos & Associates Inc.   |  |  |  |  |
| HYDROSCAPE  | Funk et al., 2017   | University of Alberta, Canada  |  |  |  |  |
| 3D дисперсия, «mobile/immobile» области, кинетика первого нулевого порядков, распад |   |  |  |  |  |  |
| STANMOD:<br>3DADE (Equilibrium )<br>N3DADE (Non-equilibrium)<br>CFITM<br>CXTFIT     | Simunek, J., M. Th. van<br>Genuchten, M. Sejna, N. Toride,<br>F. J. Leij, 1999,<br>2003 Leij and Toride | USDA, Salinity Laboratory  |  |  |  |  |
|   | Трассерные полевые опыті  | al contraction of the second |  |  |  |  |
| TRAC  | Gutierrez et al., 2013  | French geological survey, BRGM   |  |  |  |  |
| Лабораторные индикаторные опыты   |   |  |  |  |  |  |
| CXTFIT  | Toride, 1995  | USDA, Salinity Laboratory  |  |  |  |  |
| Биоремедиация   |   |  |  |  |  |  |
| BIOCHLOR  | Aziz et al., 2000   | US EPA   |  |  |  |  |
| BIOSCREEN-AT  | Karanovic et al., 2007  | Groundwater 2007; 45   |  |  |  |  |

"Модель Domenico":

$$C(x, y, z, t) = C_0 f_x^0(x, t) \times f_y(y, x) \times f_z(z, x)$$

### Типизация аналитических решений (геомиграционный модуль ANSDIM) Структура фильтрационного потока Геометрия пласта Структура миграционного потока В плане • Геометрия 1D плоскопараллельный фильтрационный поток V = const• 1D микродисперсия - неограниченный - точечный

- 1D линейный осесимметричный V = V(r)•
- 2D цилиндрические координаты V = V(r, z)٠
- «Деформированные» фильтрационные потоки ٠
- в плане (скважины + естественный поток) V(x, y)
- в профиле (инфильтрация+естественный поток) V(x,z)

- 1DL+1DR микродисперсия
- 2D и 3D микродисперсия

- полуограниченный
- ограниченный
- В разрезе •
- неограниченный
  - полуограниченный
- ограниченный

### Источник вешества

- пинейный
- пластина объемный
- Расположение
  - на поверхности
  - на глубине

### Тип граничных условий

- Входная граница
  - Ірода

•

- III рода
- Выходная граница - II род (x = L)
  - II род (x = infinity)

### Граничная концентрация

- Постоянная
- Переменная C(t): ٠
- пакет - затухающая экспонента
- Импульс

### Гетерогенность пласта

- Трещиновато-пористый пласт
- Гетерогенный со стохастической ٠ изменчивостью  $\ln k : D=D(x), D=D(t)$

### Физико-химические процессы

Сорбция ٠

٠

- линейная/нелинейная
- равновесная/неравновесная
- Распад (деструкция): ٠
  - в пласте и/или
  - на границе
- Коллоидный перенос ٠
- Молекулярная диффузия

### Альтернативные решения

- ٠ Нескольких авторов
- В изображениях с обращением численными методами ٠

- Частные решения/асимптотики:
- Безнапорная фильтрация ٠
- Стационарные решения для функции концентрации ٠

# Решение геомиграционных задач в приложении к практике



- Расчеты загрязнения подземных вод по лентам тока (1D)
- Решение профильных задач миграции в потоках инфильтрационного генезиса (2D)
- Моделирование пространственных ореолов загрязнения от сосредоточенных источников (2D, 3D)
- Оценка последствий скважинного захоронения жидких отходов в геологических формациях (1DR)
- Прогноз загрязнения водозаборов подземных вод (2D)

Береговые водозаборы

Водозаборы (скважины) в условиях природной гидрогеохимической зональности

| Водозаборы  | >  | Пласты с перетеканием  |  |   |                      |   |   |
|---|----|--|--|---|----------------------|---|---|
| Миграция в радиальных потоках<br>Миграция в профильно-неоднородном пласте<br>1D-дисперсия | )  | Подтягивание соленых вод<br>Плановая зональность<br>Береговые водозаборы                 |  |   |                      |   |   |
| Пространственная дисперсия  | -> | Массоперенос Окно Справка Выход  |  |   |                      |   |   |
|   |    | Водозаборы   |  |   |                      |   |   |
|   |    | Миграция в радиальных потоках  |  | Нагнетание в пласт  |                      |   |   |
|   |    | Миграция в профильно-неоднородном пласте<br>1D-дисперсия<br>Пространственная дисперсия > |  | Нагнетание в трещину  |                      |   |   |
|   |    |  |  | Массоперенос Окно Справка В   | Выход                |   |   |
|   |    |  |  | Водозаборы  |                      | > |   |
|   |    |  |  | Миграция в радиальных потока<br>Миграция в профильно-неодно<br>1D-дисперсия | ах<br>ородном пласте | > |   |
|   |    |  |  | Пространственная дисперсия  |                      | > | 2D плановая дисперсия                   |
|   |    |  |  |   |                      |   | 2D профильная дисперсия<br>3D-аисперсия |



### Основные процессы и параметры

| Процесс Характеристика |                                | Параметры  |  |  |  |  |
|------------------------|--------------------------------|--|--|--|--|--|
| Voupounug              | Скорость Дарси                 | V  |  |  |  |  |
| Конвекция              | Действительная скорость        | U = V/n (n - пористость/трещиноватость)            |  |  |  |  |
| II                     | Однородные породы              | $\delta_L, \ \delta_T$                             |  |  |  |  |
| дисперсия              | Гетерогенные: $D(x)$ , $D(t)$  | $\sigma_Y^2$ , $l_x$ , $l_z$ , $Y = \ln k$         |  |  |  |  |
| Сорбция                | Пористые породы                | $K_d, R = K_d \rho_b / n$                          |  |  |  |  |
|                        | Трещиноватые породы            | $K_a, R = K_a S_b / n$                             |  |  |  |  |
| Распад                 | В пласте                       | λ  |  |  |  |  |
|                        | В источнике                    | $\lambda_{\Gamma}$                                 |  |  |  |  |
| Пройная норнотости     | Коэффициент массообмена        | $\lambda_m$ (неогр.емк.), $\alpha_m$ (соср.емк.)   |  |  |  |  |
| двоиная пористость     | Коэффициент сорбции            | $K_{a}$ (трещины), $K_{d}$ (блоки)                 |  |  |  |  |
| Коллоидный перенос     | Сорбция на коллоидных частицах | $K_{1i}$ (мобильные), $K_{1i}^{s}$ (сорбированные) |  |  |  |  |
|                        | Сорбция коллоидов на породе    | $K_i$  |  |  |  |  |

# Пример: 1D влияние типа ГУ (стабильный компонент)





| C <sub>0</sub>  | Mo                | v     | n   | δ  | D <sub>m</sub> | R |
|-----------------|-------------------|-------|-----|----|----------------|---|
| мг/л            | мг/м <sup>2</sup> | м/сут | -   | М  | м²/сут         | - |
| 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>6</sup>   | 0.2   | 0.3 | 10 | 0              | 2 |





### Ступенчатая функция



### Импульс



### Импульс



Полуограниченный пласт ГУ І рода

Неограниченный пласт

Полуограниченный пласт ГУ III рода

# Пример: 1D влияние типа ГУ (распад в пласте и в источнике загрязнения) Ступенчатая функция





Параметры, определяющие условия решения миграционной задачи

| C <sub>0</sub> | Mo                | v     | n   | δ | D <sub>m</sub>     | R   | λ                    |
|----------------|-------------------|-------|-----|---|--------------------|-----|----------------------|
| Бк/л           | Бк/м <sup>2</sup> | м/сут |     | м | м²/сут             |     | 1/сут                |
| 10             | 100               | 0.2   | 0.3 | 2 | 5·10 <sup>-5</sup> | 2.5 | 7.3·10 <sup>-4</sup> |

### Условные обозначения



# Гетерогенные водоносные породы: учет масштабных эффектов



Трещиновато-пористые породы (среды с двойной пористостью)



Параметры: диффузия  $D_m$ , сорбция в трещинах и пористой матрице  $R_f$  и  $R_m$ , то же распад  $\lambda$ 

коэффициенты массообмена:  $\lambda_m = \frac{S_b^2 D_{em}}{n_m R_m}$   $\alpha_m = \frac{\omega D_{em}}{a_m^2 n_m R_m}$ 

Пористые и трещиноватые породы С пространственно-неупорядоченной проницаемостью



# Учет миграции растворенного вещества на коллоидах в рамках К<sub>d</sub> концепции 🕸

### Концептуальное представление сорбционных процессов



| Реакция                                     | Const.                 |
|---|------------------------|
| $M_1 + A_2 = M_1 A_2$                       | <i>K</i> <sub>12</sub> |
| $M_1 + \overline{S}_R = \overline{M_1 S_R}$ | $\overline{K}_1$       |
| $M_1 + A_2S_R = M_1A_2S_R$                  | $K_{12}^S$             |

$$\frac{\mathsf{M}_1-\mathsf{ион},\,\mathsf{A}_2-\mathsf{коллоид},}{\mathsf{M}_1\mathsf{S}_R-\mathsf{адс.ион}\,\,\mathsf{M}_1}, \frac{\mathsf{S}_R-\mathsf{породa}}{\mathsf{M}_1\mathsf{A}_2\mathsf{S}_R}-\mathsf{адc.колл}.$$

### Исходное дифференциальное уравнение



### Сравнение численной и эффективной аналитической модели

### Пример многофазной коллоидной системы

| i | $C_{i0}^T$ , mp/ $\pi$ | $\overline{K}_i$ | $\overline{K}_{1i}$ , л/мг |
|---|------------------------|------------------|----------------------------|
| 2 | 0.5                    | 0.0              | 3                          |
| 3 | 1.0                    | 0.1              | 0.3                        |
| 4 | 2.0                    | 0.3              | 0.15                       |
| 5 | 5.0                    | 0.5              | 0.1                        |
| 6 | 1.5                    | 0.7              | 0.03                       |

Значения  $C_{i0}^{T}$ ,  $\overline{K}_{i}$  и  $\overline{K}_{1i} (= K_{1i}^{S})$  для коллоидной «смеси»



# Геомиграционная схематизация, процессы и параметры



### Схематизация: 1D перенос



### Процессы и параметры

### Радионуклид и порода

- Форма переноса (Am-243):
  - ионная
  - на коллоидах ИББ
- Порода: гнейсы
  - трещиноватость n=0.3%
  - пористость блоков n<sub>0</sub>=0.5%
  - удельная поверхность S<sub>b</sub>=0.1 м-1

### Процессы:

- Конвекция:
  - скорость Дарси V=3.25е-5 м/сут (k=1e-4 м/сут, I=...м/м)
  - действительная скорость U=4 м/год
- Дисперсивность  $\delta_L$ =10 м
- Радиоактивный распад Т<sub>1/2</sub>=7380 лет
- Диффузия, сорбция, распад в блоках, Dm, Kd,  $\lambda$
- Сорбция в трещинном пространстве K<sub>a</sub>=20 см
- Сорбция на коллоидах: К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub>, К<sub>12</sub>

### Источник:

- С0=1е6 Бк/л
- Время действия tp=400 лет

# Процессы: конвекция Ат-243 в трещинах+сорбция+гидродисперсия







# + радиоактивный распад ( λ = 2.55\*10<sup>-7</sup> 1/сут)



# +массообмен с пористой матрицей (р/модель неограниченной емкости)



# + миграция Am-243 на коллоидных частицах (K<sub>2</sub>=0, K<sub>12</sub>=3.2\*10<sup>4</sup> см<sup>3</sup>/г Ccoll=10 мг/л



# + миграция Am-243 на коллоидных частицах (K<sub>2</sub>=0, K<sub>12</sub>=3.2\*10<sup>4</sup> см<sup>3</sup>/г С<sub>соll</sub>=20 мг/л)



# + миграция Am-243 на коллоидных частицах (K<sub>2</sub>=0, K<sub>12</sub>=3.2\*10<sup>4</sup> см<sup>3</sup>/г С<sub>соll</sub>=40 мгл)



# + миграция Am-243 на коллоидных частицах (K<sub>2</sub>=0.5, K<sub>12</sub>=3.2\*10<sup>4</sup> см<sup>3</sup>/г С<sub>соll</sub>=10 м/л



# + миграция Am-243 на коллоидных частицах (K<sub>2</sub>=1, K<sub>12</sub>=3.2\*10<sup>4</sup> см<sup>3</sup>/г С<sub>10</sub>=10 м/л)







































# Двойная пористость – р/модель сосредоточенной емкости+коллоидный транс

X Параметры для коллоидов Задание концентрации коллоидов Источник: Пос Суммарная концентрация коллоидов Сохранить. СсТ должна быть значительно 1e-4 10 С сумма больше граничной концентрации Со. ПО Фазам СсТ, мг/л Решение: Tori mb. м Загрузить. K1i <= K1iS – Процессы и гр Шар - Блок Г⊓ Nº. Коллоидная фаза Ki. --К1і, л/мг К1іS, л/мг СіТ. мг/л fi. % Montmorillonit 0.5 0.0317 100 0.0317 10 🔽 Распад Сосредоточенная емкость блоков ✓ Дисперси Параметр массообы Трещиновато-пористая среда Задать коллоиды 🔽 Коллонды 1 🗄 Количество фаз 78.3222 Добавить Копировать Вставить Rc. --Источник Набл. График: Концентрация от расстояния для t = 10000 год х\_Мах, м C\_= variable скважина 3.53e+04 C<sub>coll</sub>=20 С<sub>сон</sub>=10 мг/л -C<sub>coll</sub>=40 2.82e+04 10 212e+04 5 --начальная концентрация 01.41e+04 7.06e+03 3 lb." ~ Run 🍗 0.00e+00 800.00 1200.00 ÈÈ 0.00 400.00 1600.00 2000.00 ? ╘ Ð X, M

# Семейство коллоидов, представленных несколькими минеральными фазами с различными сорбционными константами *K*<sub>2</sub>, *K*<sub>1i</sub> (*i*=2...6)



Пример численного обращения решений Лапласа в область оригинала (механизмы: конвекция, дисперсия, сорбция, р/распад, д/пористость, сорбция на коллоидах)





### Напорный водоносный горизонт



### Процессы

- 2D конвекция
- естественный поток
- инфильтрация
- линейная сорбция
- распад

Проницаемость k(z)

$$k(z) = k = \text{const}$$
$$k(z) = k_i \ i = 1, \dots, N$$
$$k(z) = k_0 - \frac{k_0 - k_m}{m} z$$
$$k(z) = k_0 \exp(-Az)$$

### Безнапорный водоносный горизонт



### Источник загрязнения

- Постоянная концентрация
- Импульс
- Ступенчатая функция

# Физико-математическая постановка



Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Уравнение баланса вещества

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

Напорный водоносный горизонт  
мидкости и газа  
Ne 1 · 1992  
В. М. ШЕСТАКОВ  
ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНОВОГО ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА  

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T - \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T - \frac{\partial H}{\partial y}\right) = \mu^{\bullet} \frac{\partial H}{\partial t} + \chi (H - H_0)$$

$$H = \frac{1}{T} \int_{0}^{x} k_1 H_x dz = H_0 - v_z^{\bullet} \Phi_z^{\bullet} - средний напор$$

$$\Phi_z^{\bullet} = \int_{0}^{z} k_1 \int_{0}^{z} k_z^{-1} \left(1 - \frac{T_z}{T}\right) dz dz - вертикальное фильтрационное сопротивление
Вертикальная скорость Дарси:
$$v_z = v_z^{\bullet} \left(1 - \frac{T_z}{T}\right) + v_z^{\bullet} \frac{T_z}{T} - \int_{0}^{z} \eta^{\bullet} \frac{\partial H}{\partial t} dz$$

$$v_z(z) = R \left(1 - \frac{T_z}{T_m}\right)$$

$$v_x = -k(z) \frac{dh}{dx} = Rk(z) \frac{x + q_0/R}{T_m}$$
Уравнение линий тока:  

$$\frac{x_0 + q_0/R}{x + q_0/R} = \frac{T_m - T_z}{T_m - T_{z0}}$$

$$T_z = \int_{0}^{z} k(z) dz$$

$$T_m = \int_{0}^{m} k(z) dz$$
Уравнение для времени миграции частиц:  

$$t = \frac{nR_d}{R} \int_{0}^{z} \frac{dz}{1 - T_z/T_m}$$$$

Уравнение характеристик

$$\frac{dt}{1} = \frac{dx}{u_x} = \frac{dz}{u_z} \qquad u_x = v_x / nR_d \quad u_z = v_z / nR_d$$

*R*<sub>d</sub> - Фактор сорбционной задержки *n* - пористость

### Безнапорный водоносный горизонт



# Построение решений для функции C(t): «концепция TTD»





- функция плотности вероятности времени миграции частицы (transit time distribution)

Напорный водоносный горизонт





Постоянная концентрация

 $C(t) = C_0 F(t)$ 

 $C_0 = const$ 

Произвольное изменение во времени

$$C_0 = C_0(t)$$
$$C(t) = \int_0^\infty C_{in}(t-\theta)F'(\theta)\exp(-\lambda\theta)d\theta$$

Импульс - дельта-функция Дирака

$$C_{in}(t) = \frac{P}{R_z} \delta(t)$$
$$C(t) = \frac{P}{R_z} F'(t) \exp(-\lambda t)$$

Р – масса вещества на единицу площади (импульс)

### Безнапорный водоносный горизонт

# Интерфейс: опции представления расчетов





# Пример анализа чувствительности миграционного процесса ПГЗРО участок «Енисейский



### Участок глубинного захоронения РАО «Енисейский»



# Схематизация условий: 2D профиль



### Постановка задачи анализа чувствительности

- Модель проницаемости k(z)
- Режим фильтрации (напорный/безнапорный)
- Глубина расположение источника (z<sub>0</sub>)

### Результаты пакерных ОФР



# Влияние гипсометрического положения интервала захоронения РАО



Интерфейс ПК для задания исходных данных

Профиль проницаемости k(z), положение источника и линии тока







# Влияние модели проницаемости k(z) и режима фильтрации (T=4.7 м<sup>2</sup>/сут







Однородный – k0=0.085 м/сут Линейная модель – k0=0.017 м/сут Экспоненциальная модель – k0=0.07 м/сут, A=0.015 1/м

Однородный – k0=0.015 м/сут Линейная модель – k0=0.029 м/сут Экспоненциальная модель – k0=0.07 м/сут, A=0.015 1/м

Безнапорный пласт



# МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСПЕРСИИ

Natural gradient test Полигон "Cape Code" (USA, Massachuset)

L LLIN.

1,11

# Пространственные ореолы (2D/3D дисперсия)



### Исходное уравнение

$$nR\frac{\partial C}{\partial t} + v\frac{\partial C}{\partial x} - D_{ex}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - D_{ey}\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - D_{ez}\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \lambda nRC = 0$$

### Процессы/параметры

- Конвекция u=v/n
- Дисперсия Dx, Dy, Dz
- Линейная сорбция R=1+Kdp/n, R=1+KaSb/n
- Распад λ

### Схематизация структуры потока

2D в плане

-

- 2D в профиле (разрезе)
  - 3D объемные потоки

### Граничные условия

- Постоянная концентрация
- Пакет
- Массовый поток
- Импульс

### Тип решения: нестационарные/стационарные

### Геометрия источников вещества





# Двумерная плановая модель





Линейный вертикальный источник



### Вертикальная пластина



### Объемный источник



# Двумерная профильная модель



### Линейный горизонтальный источник



Вертикальная пластина



### Горизонтальная пластина



### Объемный источник





# Трехмерная модель





### Горизонтальная пластина



### Точечный источник



### Линейный вертикальный источник











Вертикальная пластина





# Пример графического представления результатов 3 D расчетов





Вид ореола в плане (*х*–*у* плоскость)

### Вид ореола в разрезе (х-z плоскость)



# 3D дисперсия в потоке с учетом инфильтрации



Исходное уравнение

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u}{R}\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{w}{R}\frac{\partial C}{\partial z} - \frac{D_x}{R}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{D_y}{R}\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{D_z}{R}\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \lambda C = 0$$

w – вертикальная компонента действительной (поровой) скорости фильтрации [L/T]



### Вид ореола в разрезе (х-г плоскость)



# I. Природные факторы, определяющие изменение качество воды на водозаборах

- Плановая гидрохимическая зональность
- Профильная гидрохимическая зональность
  - o Upconing
  - о Перетекание через «водоупоры»
- Окисление сульфидов в зоне аэрации при снижении уровня подземных вод

II. Загрязнение береговых водозаборов

III. Основополагающие работы советских авторов:

- Е.Л. Минкин (Л., Недра, 1967; М., Недра, 1972)
- В.М. Гольдберг (М., Недра, 1976)
- А.Е.Орадовская, Н.Н. Лапшин (М., Недра, 1976)
- Ф.М. Бочевер, Н.Н. Лапшин, А.Е.Орадовская (М., Недра, 1979)



# Типовые условия для аналитических решений

Скважина вблизи зоны загрязнения (линейная граница раздела зон)





Скважина между двумя зонами

(полоса пресных вод)

Скважина вблизи полосы загрязнения (полоса соленых вод)



Зона загрязнения вокруг скважины (радиальная граница раздела зон)



Скважина вблизи реки: загрязнение со стороны реки, скважина между рекой и загрязнением



Поток направлен: от границы раздела зон к скважине, от скважины к границе раздела зон



Скважина вблизи загрязненной реки: поток направлен к реке поток направлен от реки



# Пример алгоритма построения решения задачи (скважина у реки в условиях естественного потока)





I. Решение задачи фильтрации и определение потенциала скорости фильтрации

$$H(x,y) = H_0 \pm ix - \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{\sqrt{(d+x)^2 + y^2}}{\sqrt{(d-x)^2 + y^2}} \qquad \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \qquad \psi = \pm qy + \frac{Q}{2\pi} \left( \arctan \frac{d+x}{y} + \arctan \frac{d-x}{y} \right) = C$$

*і* и q- градиент и расход естественного потока; d – расстояние до реки;  $\varphi(x, y) = kH(x, y)$  – потенциал скорости фильтрации

II. Определение уравнения траектории движения частиц

$$x = \sqrt{d^2 - y^2 + \frac{2dy}{\tan\left[\frac{2\pi}{Q}(\psi - qy)\right]}}$$

III. Решение кинематических уравнений движения частиц для определения TTD

$$u_{x} = \frac{dx}{dt} \qquad u_{y} = \frac{dy}{dt} \qquad t = \int_{0}^{y} \frac{dy}{u_{y}} \qquad u_{y} = \frac{Q}{2\pi mn} \left[ \frac{1}{(d-x)^{2} + y^{2}} - \frac{1}{(d+x)^{2} + y^{2}} \right]$$

IV. Решение кинематических уравнений движения частиц для определения TTD

$$\overline{C} = \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} = \frac{Q_p}{Q} = \frac{2}{\pi} \left[ \operatorname{arctg}(\overline{y}) - \frac{\overline{y}}{\overline{Q}} \right] \qquad \overline{t}(\overline{y}) = \frac{Qt}{\pi mnd^2} = 2 \int_0^{\overline{y}} \frac{\eta}{\sqrt{1 - \eta^2 + 2\eta \cot[2(\pi\overline{\psi} - \eta/\overline{Q})]} \sin^2[2(\pi\overline{\psi} - \eta/\overline{Q})]} d\eta$$



# Береговой водозабор в условиях естественного потока





Поток от реки

a \_\_\_\_

0.9309608

1000

W max, M

Q. м\*3/сут

0.1 B, H

9(21)

• Закрыть Справка...

С <--- 🔽 Поток

L start, cyr.

Зона захвата

овые водозаболы и пл

График...

Береговые водозаборы

### Поток к реке



Влияние направления естественного фильтрационного потока на

изменение минерализации в скважине



Субвертикальное подтягивание подошвенных соленых вод (в отсутствии разделяющих слоев)



Аналитическое решение Миллионщикова–Гольдберга

$$C(t) = C_0 + \sum_{1}^{l} (C_i - C_{i-1}) \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{t_{i-1}}{t}} \right)$$
$$t_{i-1} = \frac{2\pi\kappa^2 n h_{i-1}^3}{3Q}$$

# $\Delta \overline{\rho} > 0, Q > Q_{crit}$

Аналитическая аппроксимация численных решений

$$\overline{C} = 1 - \left(\frac{f_0}{\beta}\right)^{\lambda} \quad \lambda = f(\omega)$$
$$\omega = \frac{Q}{Q^{**}}, \quad Q^{**} = \frac{\pi}{3}k_r b^2 \Delta \overline{p}$$

- $\Delta \overline{\rho}$  плотностной градиент
- *Q<sub>crit</sub>* критический дебит

$$\Delta \overline{\rho} = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f$$

ρ<sub>f</sub> ρ<sub>s</sub>-плотность пресной и соленой воды

Перетекание/отжатие через разделяющие слои





Уравнение баланса вещества в дренируемом пласте имеет вид

$$m_1 m_1 \frac{\partial C_1}{\partial t} + m_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r[v_1(r)C_1] - v_0(r)C_{20} = 0$$

Компоненты скорости фильтрации  $\mathbf{v}_0$  и  $\mathbf{v}_1-$ из решения фильтрационных задач

### Перетекание

$$v_0 = \frac{k_0}{m_0} (S_1 - S_2) = \frac{Q}{2\pi B_1^2} \mathbf{K}_0 \left(\frac{r}{B}\right) \qquad v_0 \approx \overline{\mu} \alpha_0$$
$$v_1 = -\frac{Q}{2\pi m_1 r (1 + \nu)} \left[\nu + \frac{r}{B} \mathbf{K}_1 \left(\frac{r}{B}\right)\right] \qquad v_1(r, t) = -\frac{Q}{2\pi m_1}$$

### Упругое отжатие

$$v_0 \approx \overline{\mu} \alpha_0 \frac{Q}{4\pi a^*} \left( -\operatorname{Ei} \left( -\frac{r^2}{4a^* t} \right) \right) e^{-\alpha_0 t}$$

$$\left(\frac{r}{B}\right) = -\frac{Q}{2\pi m_1 r} \left\{ 1 - (1 - \overline{\mu})(1 - e^{-\xi}) - \overline{\mu}\alpha_0 t e^{-\alpha_0 t} \left[ 1 - \xi \operatorname{Ei}(-\xi) - e^{-\xi} \right] \right\}$$

Влияние различий плотности соленых ( $\rho_s$ ) и пресных ( $\rho_f$ ) вод



Влияние параметра перетекания (*B*) и дебита скважины (Q)





Аналитическое моделирование в вычислительной среде Ansdimat позволяет:

- Оценить значимость различных миграционных механизмов при их взаимно наложении при прогнозировании, т.е. выполнить анализ чувствительности и многовариантные оценки
- Исключить влияние численной дисперсии на сеточных моделях на результаты прогноза
- Определить круг миграционных параметров для экспериментального (лабораторного и полевого определения)
- Дополнить курсы учебных дисциплин в вузах



# Дальнейшее развитие программного комплекса

- Решения миграционных задач в терминах статистических моментов
- Расширение физико-химического блока
  - нелинейные изотермы сорбции
  - цепочки радиоактивного распада
  - реакции растворения-осаждения
- Модели для ОМР (полевые индикаторные опробования)
- То же для лабораторных опытов
- То же для интерпретации региональных исследований изотопного возраста подземных вод
- Модели для расчета скважинах систем реабилитации загрязненных участков подземных вод
- Модели, учитывающие влияние переменной плотности на концентрационные распределения.
- Модели многофазный фильтрации (растворенная фаза)
- Создание базы скрининговых (экспертных) параметров



Спасибо за внимание!