

Термогидродинамическое моделирование влияния глубинных разломов и каналов дегазации на динамику подземных вод

В.М. Шестопапов, А.С. Богуславский, 2020

Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических полигонных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 3 февраля 2020 г.

Розроблено термогидродинамічну профільну модель вертикального розрізу геологічного середовища підземних вод з урахуванням глибинних активних геодинамічних зон. Такими зонами (швидкої фільтрації і міграції — ЗШФМ) є власне проникні розломи і приурочені до них западини та підзападинні канали дегазатії. Глибина їх може бути різною, але встановлені й дуже глибокі (понад 7 км). У цих умовах постановка суто гідродинамічної задачі є недостатньою. Необхідно враховувати і тепловий потік, що йде з надр і впливає на гідродинамічні особливості фільтрації. Застосована авторами програма «HYDROTHERM», яку розроблено в Геологічній службі США, дає змогу вирішувати такі завдання. Гідрогеологічну схематизацію модельного вертикального профілю обрано відповідно до його передбачуваного розташування в межах Лівобережжя Київської області, межиріччя Дніпро—Трубіж. Для побудови моделі використано наявні дані щодо розміщення, щільності розподілу на території і характеристикам активності ЗШФМ. Отримано вертикальні розподіли температури і швидкостей потоків флюїдів і з'ясовано глибинний вплив ЗШФМ на їх формування. Підтверджено наявність на глибині 3—7 км при заданих параметрах моделі зони дилатансії, яка характеризується розгалуженням тріщин геологічного середовища. У цій зоні відбуваються стрибкоподібний процес розрядження напружено-деформованого стану порід зі зменшенням глибини, зниження тиску висхідних флюїдів та їх поетапна дегазатія. Активізація флюїдних потоків на цих глибинах без попереднього завдання підвищеної проникності на моделі свідчить про участь флюїдів у формуванні зони дилатансії.

Ключові слова: геологічне середовище, проникність, фільтрація, міграція, моделювання, флюїди, дегазатія, зона дилатансії.

Введение. Обычно при решении методами математического моделирования гидрогеологических задач, применяемых для небольших глубин зоны интенсивного водообмена и имеющих преимущественно прикладной характер, длительность прогноза исчисляется годами или десятками лет. В этих условиях достаточным является чисто гидродинамическая постановка задачи. Иное дело, когда исследование ведется для больших глубин, и прогноз ведется на

длительные периоды времени с целью выявления тенденций глубинных процессов с учетом аномальных активных зон. Такими зонами (зоны быстрой фильтрации и миграции — ЗБФМ) являются собственно пронизываемые разломы и приуроченные к ним западины и подзападинные каналы. Глубина их может быть различной, но установлены и очень глубокие (более 7 км) [Шестопапов и др., 2018]. В этих условиях постановка чисто гидродинамической за-

дачи является недостаточной. Необходимо учитывать и тепловой поток, идущий из недр и влияющий на гидродинамические особенности фильтрации. Созданная в Геологической службе США программа «HYDROTHERM» позволяет решать такие задачи. Для исследования был выбран участок между речья Днепр—Трубеж. Для более четкого представления эффектов, вызываемых взаимодействием гидродинамического и теплового полей при наличии ЗБФМ, расположение этих зон задано на равных расстояниях.

Уравнения базовой модели. Авторами применялась нестационарная математическая модель HYDROTHERM Геологической службы США, которая имитирует трехмерный двухфазный поток подземных вод и перенос тепла в диапазоне температуры 0—1200 °С и давления 0—10⁹ Па. Решение начально-краевой задачи тепломассопереноса для системы уравнений баланса массы и энергии, которые представляются в терминах давления (P) и энтальпии (H) соответственно, получается численно с помощью метода конечных разностей. Базовые уравнения модели сводятся к виду

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [\varphi (\rho_w S_w + \rho_s S_s)] - \\ & - \nabla \frac{\mathbf{k} k_{rw} \rho_w}{\mu_w} [\nabla P + \rho_w g \mathbf{e}_z] - \\ & - \nabla \frac{\mathbf{k} k_{rs} \rho_s}{\mu_s} [\nabla P_g + \rho_s g \mathbf{e}_z] - q_{sf} = 0 \quad (1) \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [\varphi (\rho_w h_w S_w + \rho_s h_s S_s) + (1 - \varphi) \rho_r h_r] - \\ & - \nabla K_a \mathbf{I} \nabla T + \nabla \varphi (S_w \rho_w h_w \mathbf{v}_w + S_s \rho_s h_s \mathbf{v}_s) - \\ & - q_{sh} = 0, \quad (2) \end{aligned}$$

где φ — пористость (безразмерная), ρ_w ,

ρ_s , ρ_r — плотность воды, пара и матрицы породы соответственно (кг/м³); S_w , S_s — насыщение воды и пара соответственно (безразмерное); \mathbf{k} — тензор проницаемости геологической среды (м²); k_{rw} , k_{rs} — относительная проницаемость воды и пара соответственно (безразмерная); μ_w , μ_s — вязкость воды и пара соответственно (Па · с); p , p_g — давление флюида в жидкой и газовой фазе соответственно (Па); h_w , h_s , h_r — удельная энтальпия воды, пара и матрицы породы соответственно (Дж/кг); T — температура, (°С); K_a — эффективная теплопроводность флюидо-газонасыщенной пористой среды (Вт/м/°С); g — ускорение земного тяготения (м/с²); \mathbf{v}_w , \mathbf{v}_s — действительная скорость фильтрации жидкости и пара соответственно (м/с); \mathbf{e}_z — единичный вектор в направлении оси z (безразмерный); q_{sf} — массовая интенсивность источника флюида (кг/м³/с); q_{sh} — интенсивность источника энтальпии (Вт/м³); \mathbf{I} — единичная матрица ранга 3 (безразмерная); Δ — пространственный градиент (м⁻¹); t — время (с).

Допущения, присущие базовым уравнениям (1) и (2), подробно обсуждаются в описаниях модели [Науба, Ingebritsen, 1994; Kipp et al., 2008].

В настоящей статье выполнялось двумерное термогидродинамическое моделирование с использованием версии 3 программы «HYDROTHERM-2D-Interactive», которая позволяет получать для рассматриваемого вертикального сечения геологической среды диаграммы полей температуры, энтальпии и массового расхода потока флюида с построением векторов действительной скорости фильтрации, а также наблюдать их прогнозную эволюцию во времени [Kipp et al., 2008].

Схематизация модели, граничные условия и параметры. Гидрогеологическая схематизация модельного вертикального профиля длиной 40 км и глубиной 10 км выбиралась в соответствии с его предполагаемым расположением в Киевской обл., в пределах между речья Днепр—Трубеж. Для этого бассейна ранее была разработана детальная трехмерная гидро-

геологическая модель для зоны активного водообмена на сетке детальности 200 м, в которой использованы данные по расположению, плотности распределения по территории и характеристикам активности ЗБФМ [Шестопалов и др., 2018]. На основании этих данных выбрано расположение профиля модели, который проходит с запада на восток от р. Днепр до р. Трубеж по линии Киев—Бровары. Средняя встречаемость крупных ЗБФМ размера 0,5—1 км вдоль профиля составляет 2 зоны на 10 км.

Целью статьи является исследование глубинного влияния ЗБФМ на формирование полей температуры и скорости потоков флюида, которые связаны с процессами дегазации в геологической среде.

Область, конечно-разностная сетка модели и зоны задания проницаемости геологической среды показаны на рис. 1.

По горизонтали (ось x) разбивка равномерная с шагом 500 м (80 блоков). По вертикали (ось z , снизу вверх) разбивка следующая: 20 блоков по 400 м ($z = 0 \div 8000$ м), 17 блоков по 100 м ($z = 8000 \div 9700$ м), 1 блок 75 м ($z = 9700 \div 9775$ м), 9 блоков по 25 м ($z = 9775 \div 10\,000$ м).

Поверхность Земли по длине профиля (40 км) равномерно понижается на 0,225 км с востока на запад от $z = 10$, до 9,775 км (граница разгрузки р. Днепр).

На профиле расположены 7 ЗБФМ на равном расстоянии 5 км друг от друга с центрами $x = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35$ км. Ширина каждой зоны 1 км (2 блока). На поверхности им соответствуют локальные понижения рельефа на 25 м.

На верхней границе профиля задан массовый поток инфильтрационного питания 1,6 кг/с на блок (площадь блока 0,5 км²), что примерно соответствует инфильтрации 100 мм/год.

Теплофизические параметры геологической среды (удельные теплоемкость и теплопроводность пород) выбраны в соответствии с рекомендациями авторов математической модели [Науба, Ingebritsen, 1994]. На верхней границе модели задана температура 9 °С. Вертикальный градиент температуры принимался равным 20 °С/км в соответствии с данными работы Р.И. Кутаса [Кутас, 1978] о распределении температуры по территории Украины на глубине 10 км. Начальное распределение температуры задано ступенчато возрастающим с глубиной шагом 1 км.

На нижней границе задан базальный поток тепла 60 мВт/м², согласно данным Ройстацера, Ингебритсена и Хайбы [Rojstaczer et al., 2008].

Проницаемость геологической среды k (м²) убывает ступенчато с глубиной в соответствии с данными работы [Витовтова и др., 2011], а в ЗБФМ повышена по сравнению с фоном [Шестопалов и др., 2018]. Значения проницаемости по зонам заданы в соответствии со шкалой (см. рис. 1).

Прогнозное моделирование выполнялось на период времени 10 млн лет.

Результаты моделирования. Моделирование показывает формирование ряда зон вертикальных восходящих и нисходящих потоков флюида и тепла, области максимальных величин которых

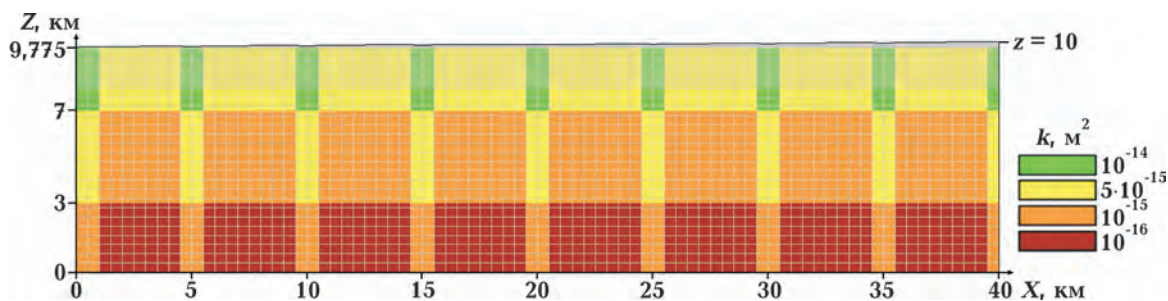


Рис. 1. Дискретизация модельного профиля и зоны проницаемости геологической среды k , м².

Fig. 1. Discretization of the model section and zones of the geological environment permeability, k (m²).

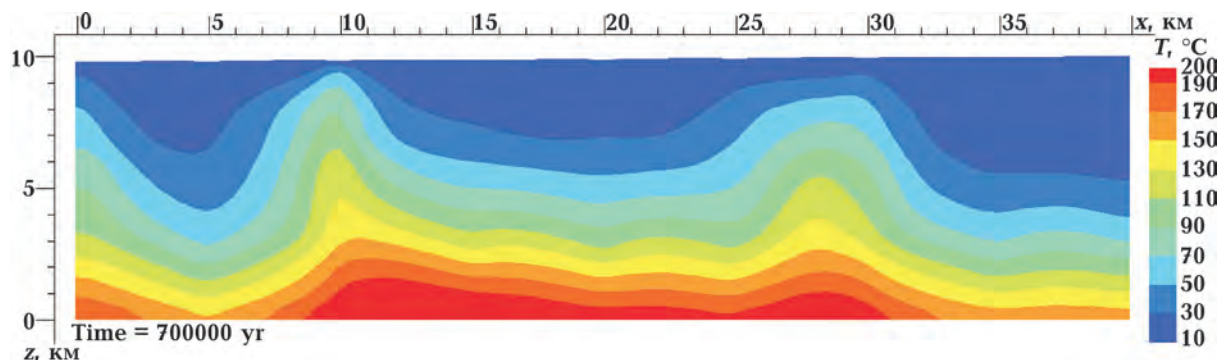


Рис. 2. Температура, $T^{\circ}\text{C}$. Время 0,7 млн лет.
 Fig. 2. Temperature, $T^{\circ}\text{C}$. Time 0,7 million years.

наблюдаются в ЗБФМ. Пикам восходящих потоков флюида и тепла соответствуют температурные волны, которые с течением времени поднимаются и затухают в ЗБФМ и смещаются влево по профилю в сторону основной разгрузки (р. Днепр).

Эволюция поля температуры флюида в модельном сечении в последовательные интервалы времени за период прогноза 10 млн лет характеризуется следующим образом:

- $t = 0,5 \div 0,7$ млн лет (рис. 2) — формирование максимума температуры сначала в ЗБФМ $x = 30$ км, затем в ЗБФМ $x = 10$ км;
- $t = 0,7 \div 1,2$ млн лет (рис. 3) — формирование максимума в ЗБФМ $x = 25$ км и снижение в ЗБФМ $x = 10$ км и $x = 30$ км;
- $t = 1,2 \div 2,2$ млн лет (рис. 4) — формирование максимума в ЗБФМ $x = 20$ км;
- $t = 2,2 \div 3,4$ млн лет (рис. 5) — формирование

- максимума в ЗБФМ $x = 15$ км и рост в ЗБФМ $x = 30$ км;
- $t = 3,4 \div 4,2$ млн лет — формирование максимума в ЗБФМ $x = 25$ км и снижение в ЗБФМ $x = 15$ км;
- $t = 4,2 \div 4,8$ млн лет — формирование максимума в ЗБФМ $x = 10$ км и снижение в ЗБФМ $x = 25$ км;
- $t = 4,8 \div 5,4$ млн лет — формирование максимума в ЗБФМ $x = 20$ км (аналогично интервалу 1,2—2,2 млн лет, рис. 4);
- $t = 5,4 \div 6,6$ млн лет — формирование максимума в ЗБФМ $x = 15$ км и рост в ЗБФМ $x = 30$ км (аналогично интервалу 2,2—3,4 млн лет, рис. 5);
- $t = 6,6 \div 7,4$ млн лет — формирование максимума в ЗБФМ $x = 25$ км и снижение в ЗБФМ $x = 15$ км (аналогично интервалу 3,4—4,2 млн лет);
- $t = 7,4 \div 8,6$ млн лет — формирование мак-

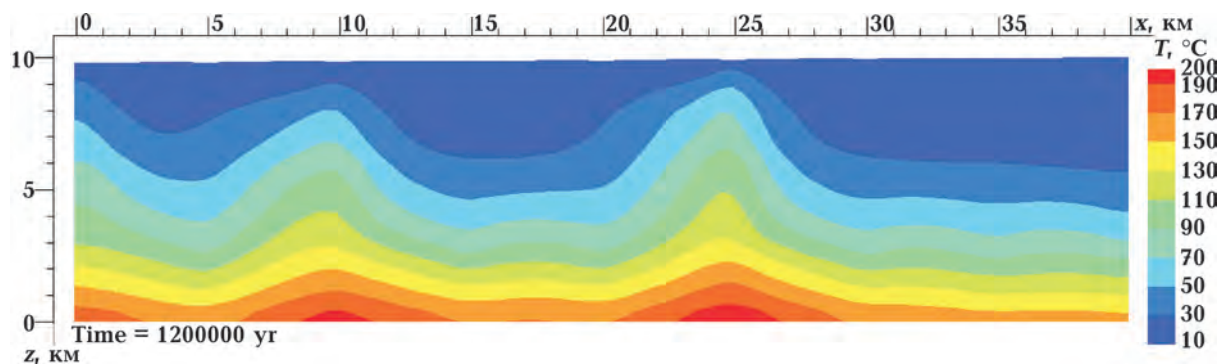


Рис. 3. Температура, $T^{\circ}\text{C}$. Время 1,2 млн лет.
 Fig. 3. Temperature, $T^{\circ}\text{C}$. The time 1,2 million years.

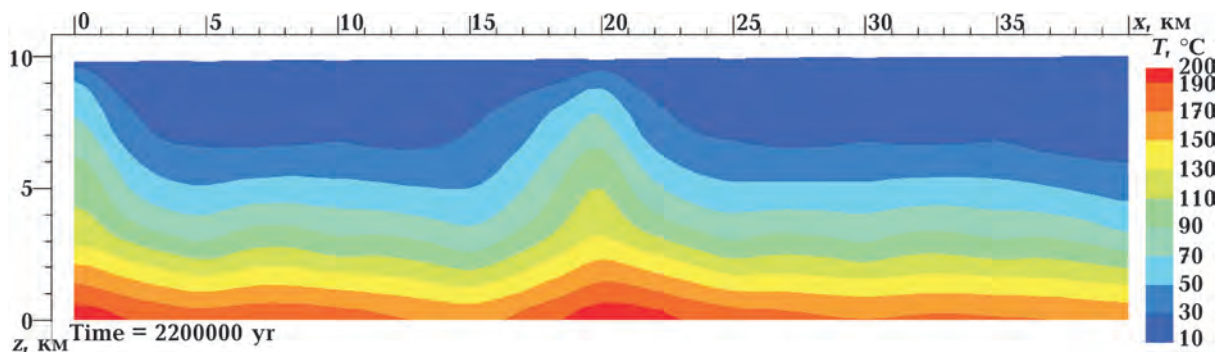


Рис. 4. Температура, T °С. Время 2,2 млн лет.
 Fig. 4. Temperature, T °С. Time 2,2 million years.

сумма в ЗБФМ $x = 20$ км (аналогично интервалам 1,2—2,2 и 4,8—5,4 млн лет, рис. 4);

$t = 8,6 \div 10$ млн лет — формирование максимума в ЗБФМ $x = 15$ км, и рост в ЗБФМ $x = 30$ км (аналогично интервалам 2,2—3,4 и 5,4—6,6 млн лет).

Таким образом, максимумы температурных волн имеют циклический характер и наступают во времени поочередно, сначала в ЗБФМ $x = 30$ и $x = 10$ км, и затем периодически повторяются в трех центральных ЗБФМ ($x = 25, 20, 15$ км).

На рис. 6 показаны графики изменения во времени температуры в трех центральных ЗБФМ профиля и двух промежуточных фоновых участках: $x = 25$ км (ЗБФМ, кривая 1), $x = 22,5$ км (фон, кривая 2), $x = 20$ км (ЗБФМ, кривая 3), $x = 17,5$ км (фон, кривая 4), $x = 15$ км (ЗБФМ, кривая 5). Графики

построены для трех различных значений глубины $d = 10 - z$ (км) (А: $d = 0,25$ км, В: $d = 1$ км, С: $d = 5$ км).

Анализируя эти графики, можно заметить, что максимумы температуры, следовательно, восходящего потока и дегазации флюида в ЗБФМ наблюдаются циклично с интервалом примерно 3,2 млн лет по мере прохождения температурных волн вдоль модельного профиля в направлении основной разгрузки (р. Днепр). На фоновых участках пики температуры ниже, чем в ЗБФМ, однако с увеличением глубины соотношение температуры в ЗБФМ и на фоне выравнивается, а синхронность во времени нарушается, что выражается в более позднем наступлении пика температуры на фоне по сравнению с соответствующей ЗБФМ. Это можно объяснить увеличением относительной

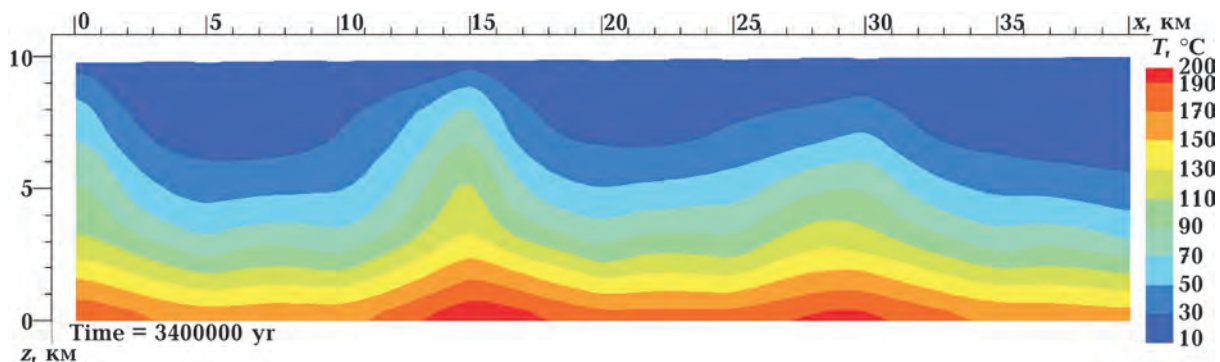


Рис. 5. Температура, T °С. Время 3,4 млн лет.
 Fig. 5. Temperature, T °С. Time 3,4 million years.

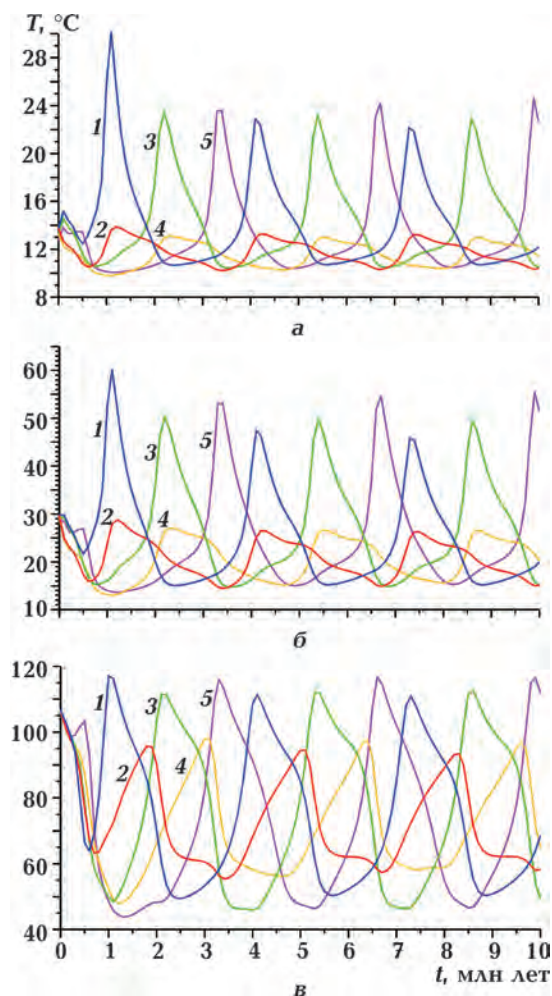


Рис. 6. Изменение во времени температуры на глубине: *а* — 250 м, *б* — 1000 м, *в* — 5000 м в трех центральных ЗБФМ профиля (кривые 1, 3, 5) и двух их промежуточных фоновых участках (кривые 2, 4).

Fig. 6. Temperature time variation at depth: *a* — 250 m, *b* — 1000 m, *v* — 5000 m, in three central fast filtration and migration zone (FFMZ) profiles (curves 1, 3, 5) and their two intermediate background sections (curves 2, 4).

разности скоростей потока в ЗБФМ и на фоне с глубиной в условиях более высоких температур и давлений флюида.

Отметим, что поле энтальпии, которое характеризует запас тепловой энергии флюида на единицу массы (Дж/кг), изменяется аналогично температуре.

Эволюция модуля массового расхода потока флюида Q , г/(см²·с) в модельном сечении происходит в соответствии с описанной выше эволюцией поля температуры. Максимумам температуры в ЗБФМ соответствуют максимумы восходящего потока, и следовательно, дегазации. На рис. 7 и 8 показаны для примера диаграммы Q соответственно для значений времени прогноза 0,5 млн лет (активная ЗБФМ $x = 30$ км) и $t = 0,7$ млн лет (активная ЗБФМ $x = 10$ км).

Детальная диаграмма Q на время 0,7 млн лет для части разреза, включающей ЗБФМ $x = 5, 10$ и 15 км (активна ЗБФМ $x = 10$ км) и их промежуточные фоновые участки, показана на рис. 9. По вертикальной оси указана глубина d . Величину и направление потоков указывают стрелочки — «флюгеры», направленные от точки по потоку, с длиной, соразмерной величине Q .

Как видно на рис. 7 и 8, восходящие потоки наблюдаются в активных ЗБФМ, начиная с глубин 8—9 км и усиливаясь по мере подъема. На детальном рис. 9 хорошо видна потоковая структура вблизи активной ЗБФМ. Наряду с глубинным восходящим потоком, в интервале глубин

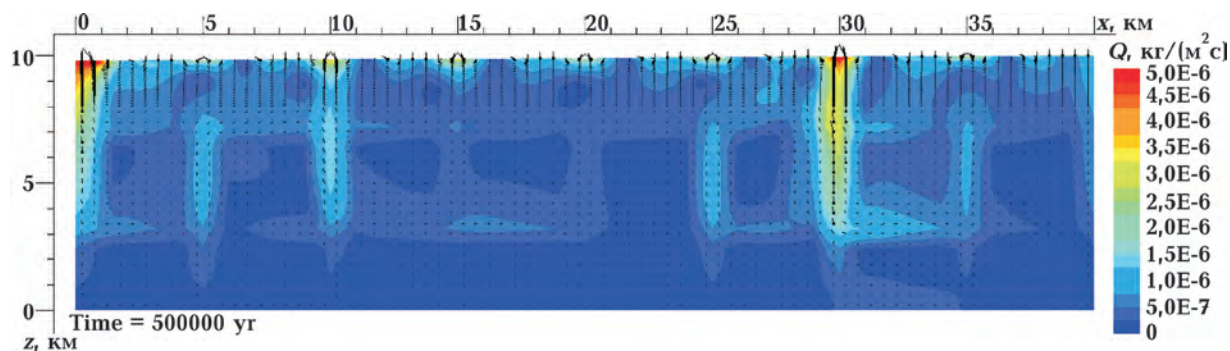


Рис. 7. Модуль расхода потока, Q , $t = 0,5$ млн лет.

Fig. 7. The flow rate modulus, Q , kg/(m²·s). Time $t = 0,5$ million years.

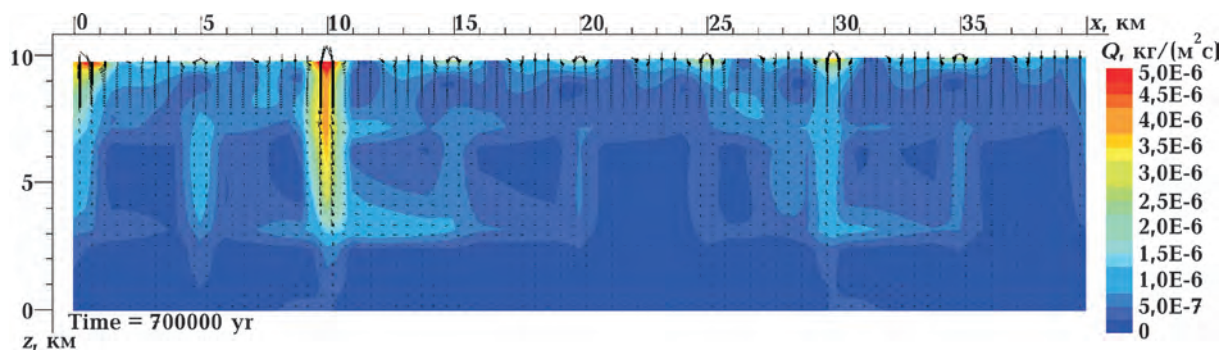


Рис. 8. Модуль расхода потока, Q , $t = 0,7$ млн лет.

Fig. 8. The flow rate modulus, Q , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Time $t = 0,7$ million years.

3—7 км можно наблюдать латеральные притоки к центральному стволу ЗБФМ справа. Слева от активной ЗБФМ $x = 10$ км наблюдается латеральный поток к западу в интервале глубин 1—3 км до следующей еще неактивной ЗБФМ $x = 5$ км, по которой поток заглубляется вертикально, а затем поворачивает латерально на восток по горизонту глубины 7 км, возвращаясь к активной ЗБФМ.

В дальнейшем с течением времени ($t = 0,7 \div 10$ млн лет) зона максимальных вертикальных потоков (активности) переходит с одной ЗБФМ на другую в соответствии с приведенными выше диаграммами и графиками изменения температуры (см. рис. 2—5, 6). При этом структуры потока активной и соседних к ней ЗБФМ и фоновых участков подобны показанным на рис. 7—9.

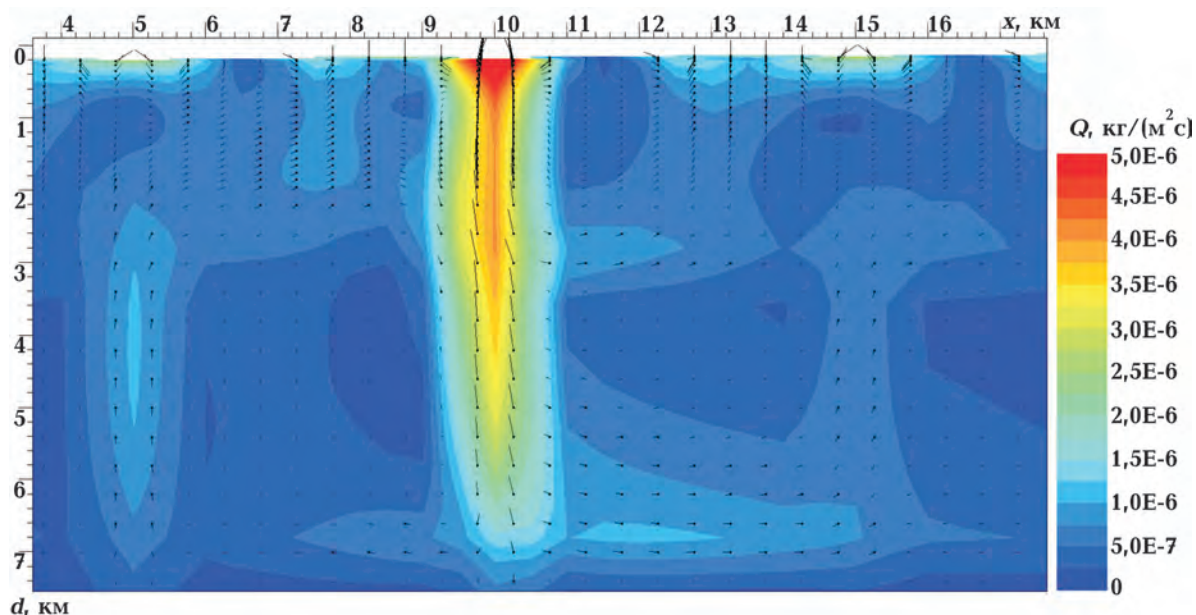


Рис. 9. Детальная диаграмма модуля расхода потока Q на участке профиля с ЗБФМ $x = 5$, 10 (активная), 15 км и их промежуточных фоновых участков, время $t = 0,7$ млн лет.

Fig. 9. Detailed diagram of the flow rate modulus Q , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, in the FFMZ sections $x = 5$, $x = 10$ (active), $x = 15$ km, and their intermediate background sections. Time $t = 0,7$ million years.

На рис. 10 (а и б) показаны соответственно графики изменения с глубиной вертикальной V_z и горизонтальной V_x компонент действительной скорости фильтрации на время $t = 0,7$ млн лет для ЗБФМ $x = 5, 10$ (активная) и 15 км (кривые соответственно 1, 3, 5). Кривые 2 и 4 соответствуют их промежуточным фоновым участкам с запада ($x = 7,5$ км) и востока ($x = 12,5$ км).

Положительные значения V_z соответствуют восходящему потоку, а положительные значения V_x — латеральному потоку в восточном направлении (вправо). В активной ЗБФМ $x = 10$ км (рис. 10, а, кривая 3) по всему вертикальному профилю наблюдается восходящий поток с максимальными значениями скорости в интервале глубин 3—7 км. В соседних справа и слева ЗБФМ (кривые 1 и 5) в этом интервале глубин наблюдаются относительные максимумы нисходящего потока. На соседних слева и справа фоновых участках (кривые 2 и 4) V_z убывает от поверхности до глубины 500 м,

оставаясь положительной, а далее меняет знак на нисходящее направление и с глубиной убывает по величине. Горизонтальная компонента скорости V_x в активной ЗБФМ $x = 10$ км (рис. 10, в, кривая 3) имеет экстремумы противоположных знаков на глубинах 3 и 7 км. Им соответствуют и экстремумы соседних ЗБФМ (кривые 1 и 5) и фоновых участков (кривые 2 и 4). Это согласуется с общей схемой потоков в разрезе (см. рис. 9), которую можно представить как два взаимосвязанных круговорота в вертикальном сечении: слева от активной ЗБФМ по часовой стрелке, а справа — против, которые в активной ЗБФМ сливаются в один мощный восходящий поток.

Таким образом, в интервале глубин 3—7 км можно наблюдать экстремальные значения вертикальных и латеральных компонент скорости потока и их градиентов, а также смену направлений потоков во времени. Этот интервал можно трактовать как иллюстрацию зоны дилатансии

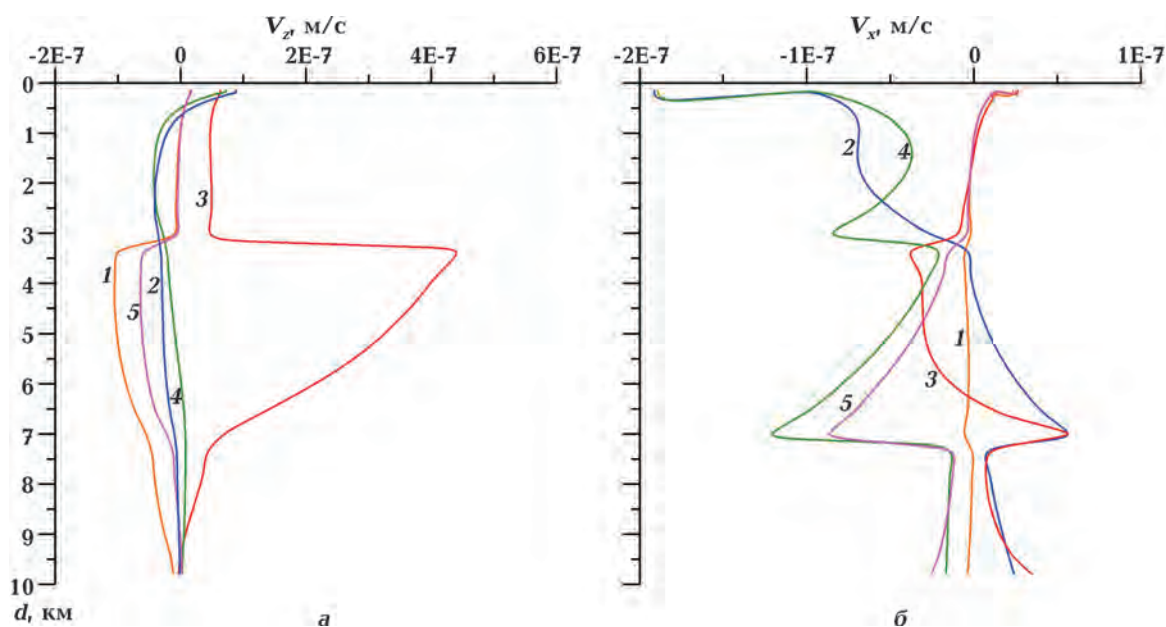


Рис. 10. Распределение по глубине вертикальной V_z (а) и горизонтальной V_x (б) компонент действительной скорости фильтрации на время $t = 0,7$ млн лет: 1 — ЗБФМ $x = 5$ км; 2 — фоновый участок $x = 7,5$ км; 3 — активная ЗБФМ $x = 10$ км; 4 — фоновый участок $x = 12,5$ км; 5 — ЗБФМ $x = 15$ км.

Fig. 10. The depth distribution of the vertical V_z (a) and horizontal V_x (б) components of the actual filtration rate at time $t = 0,7$ million years: 1 — FFMZ, $x = 5$ km; 2 — background section, $x = 7,5$ km; 3 — active FFMZ, $x = 10$ km; 4 — background section, $x = 12,5$ km; 5 — FFMZ, $x = 15$ km.

[Rojstaczer et al., 2008; Шестопапов, 2014], которая характеризуется ветвлением путей потока (трещин) геологической среды.

Важно подчеркнуть, что первоначально в модели зона дилатансии как относительно более проницаемый интервал пород не задавалась. Из этого следует, что теплоперенос флюидов в указанном интервале способствует более активному взаимодействию в системе флюид—порода и, следовательно, наряду с разрядкой напряженности горных пород, участвует в формировании интервала повышенной проницаемости.

Выводы. На основании результатов моделирования можно сделать следующие предварительные выводы.

1. При стационарном задании инфильтрации на верхней границе и теплового потока на нижней границе модели, но при наличии системы ЗБФМ в поле модели, процесс переноса флюида и тепла осуществляется волнообразно и квазистационарно, что является необычным для традиционных гидродинамических и термодинамических задач со стационарными граничными условиями.

2. Процесс преференциального переноса массы флюида сопровождается волнами температуры и потока энергии. Пики этих волн достигаются поочередно в ЗБФМ с интервалом времени порядка 3 млн лет. При этом в них чередуются режимы вертикального восходящего и нисходящего потоков, что в верхней гидродинамической зоне соответствует разгрузке и питанию подземных вод.

3. Максимумы вертикальных восходящих потоков флюида в пределах активных ЗБФМ происходят поочередно, смещаясь от одной ЗБФМ к другой в направлении общего латерального потока, и достигают глубин 8—9 км. Скорости потоков превышают значения на соответствующих фоновых участках в десятки раз. В активных ЗБФМ можно наблюдать латеральные притоки и оттоки, а также примыкающие к ним вихревые потоки (круговороты) противоположных направлений, достигающие соседних неактивных ЗБФМ и сливающихся в общий восходящий поток.

4. Подтверждается наличие на глубине зоны дилатансии, которая характеризуется ветвлением и улучшением путей потока (трещин) геологической среды не только в результате скачкообразного процесса разрядки напряженно-деформированного состояния горного массива, но и вследствие активизации взаимодействия в системе вода—порода под влиянием субвертикального преференциального теплопереноса.

5. В условиях неравномерного распределения ЗБФМ, изменений теплового поля и инфильтрации временные интервалы и параметры максимумов и минимумов теплопереноса изменяются, но волновой характер процесса сохраняется, что свидетельствует о важной роли субвертикальных преференциальных путей в формировании динамики и геохимии интегрального флюидообмена, эволюции твердых и газовых компонентов земной коры.

Список литературы

- Витовтова В.М., Шмонов В.М., Жариков А.В. Распределение пор по размерам в континентальной коре: выводы из экспериментальных данных о проницаемости. *Вестник ОНЗ РАН*. 2011. Т. 3. NZ6018.
- Кутас Р.И. Поле тепловых потоков и термическая модель земной коры. Киев: Наук. думка, 1978. 147 с.
- Шестопапов В.М. О гидродинамической зональности и водообмене в гидрогеологических структурах. *Геолог. журн.* 2014. № 4. С. 9—26.
- Шестопапов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. Очерки дегазации Земли. Киев: Изд. НИЦ РПИ, ИГН НАН Украины, 2018. 632 с.

- Hayba, D.O., & Ingebritsen, S.E. (1994). *The computer model HYDROTHERM, a three-dimensional finite-difference model to simulate ground-water flow and heat transport in the temperature range of 0 to 1200 °C*. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 94-4045. Reston, Virginia. 85 p.
- Kipp, K.L., Hsieh, P.A., & Charlton, S.R. (2008). *Guide to the Revised Ground-Water Flow and Heat Transport Simulator: HYDROTHERM, Version 3. Techniques and Methods*. 6-A25. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. 178 p.
- Rojstaczer, S.A., Ingebritzen, S.E., & Hayba, D.O. (2008). Permeability of continental crust influenced by internal and external forcing. *Geosuids*, (8), 128—139. doi: 10.1111/j.1468-8123.2008.00211.x.

Термогидродинамическое моделирование влияния глубинных разломов и каналов дегазации на динамику подземных вод

В. М. Шестопалов, А. С. Богуславский, 2020

Разработана термогидродинамическая профильная модель вертикального разреза геологической среды подземных вод с учетом глубинных активных геодинамических зон. Такими зонами (быстрой фильтрации и миграции — ЗБФМ) являются собственно проницаемые разломы и приуроченные к ним западины и подзападинные каналы дегазации. Глубина их может быть различной, установлены и очень глубокие (более 7 км). В этих условиях постановка чисто гидродинамической задачи недостаточна. Необходимо учитывать и тепловой поток, идущий из недр и влияющий на гидродинамические особенности фильтрации. Примененная авторами программа «HYDROTHERM», разработанная в Геологической службе США, позволяет решать такие задачи. Гидрогеологическая схематизация модельного вертикального профиля выбрана в соответствии с его предполагаемым расположением в пределах Левобережья Киевской области, междуречье Днепр—Трубеж. Для построения модели использованы имеющиеся данные о расположении, плотности распределения по территории и характеристиках активности ЗБФМ. Получены вертикальные распределения температуры и скоростей потоков флюидов и выяснено глубинное влияние ЗБФМ на их формирование. Подтверждается наличие на глубине 3—7 км при заданных параметрах модели зоны дилатансии, которая характеризуется ветвлением трещин геологической среды. В ней происходят скачкообразный процесс разрядки напряженно-деформированного состояния пород с уменьшением глубины, снижения давления восходящих флюидов, а также их поэтапная дегазация. Активизация флюидных потоков на этих глубинах без предварительного задания повышенной проницаемости на модели свидетельствует об участии флюидов в формировании зоны дилатансии.

Ключевые слова: геологическая среда, проницаемость, фильтрация, миграция, моделирование, флюиды, дегазация, зона дилатансии.

Thermohydrodynamic modeling of the influence of deep faults and degassing channels on groundwater dynamics

V.M. Shestopalov, A.S. Bohuslavsky, 2020

The authors developed a thermohydrodynamical 2D model of a vertical section of the geological environment of groundwater, taking into account deep active geodynamic zones. Such zones (fast filtration and migration zones — FFMZ) are actually permeable faults and their associated surface depressions and under-depression degassing channels. Their depth may be different, but they are also very deep (more than 7 km). Under these conditions, the formulation of a purely hydrodynamic problem is insufficient. It is necessary to take into account the heat flux coming from the interior and affecting the hydrodynamic features of the filtration. The HYDROTHERM program used by the authors, developed by the US Geological Survey, allows us to solve such problems. The hydrogeological schematization of the model section is selected in accordance with its intended location within the left bank of the Kyiv region, the Dnieper—Trubizh interfluvium. To build the model, the authors used the available data on the location, distribution density over the territory, and the characteristics of the FFMZ activity. The vertical distributions of temperature and fluid flow rates are obtained, and the deep influence of the FFMZ on their formation is clarified. The presence of a dilatancy zone, which is characterized by branching of fractures in the geological environment, is confirmed at a depth of 3—7 km at specified parameters of the model. In this zone, with a decrease in depth, an intermittent process of discharge of a stress-strain state of rocks, a decrease in the pressure of the ascending fluids, and their gradual degassing occur. The activation of fluid flows at these depths without preliminary specifying increased permeability in the model indicates the participation of fluids in the formation of the dilatancy zone.

Key words: geological environment, permeability, filtration, migration, modeling, fluids, degassing, dilatancy zone.

References

- Vitovtova, V.M., Shmonov, V.M., & Zharikov, A.V. (2011). Distribution of the pore sizes in the continental crust: inferences from experimental data about permeability. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*, 3, NZ6018. doi: 10.2205/2011NZ000148 (in Russian).
- Kutas, R.I. (1978). Heat flux field and thermal model of the Earth's crust. Kiev: Naukova Dumka, 147 p. (in Russian).
- Shestopalov, V.M. (2014). Hydrodynamic zones and water exchange in the hydrogeological structures. *Geologicheskii zhurnal*, (4), 9—26 (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Lukin, A.E., Zgonnik, V.O., Makarenko, A.N., Larin, N.V., & Bohuslavsky, A.S. (2018). *Essays on Earth degassing*. Kiev: Publ. Radioenvironmental Centre, Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 632 p. (in Russian).
- Hayba, D.O., & Ingebritsen, S.E. (1994). *The computer model HYDROTHERM, a three-dimensional finite-difference model to simulate ground-water flow and heat transport in the temperature range of 0 to 1200 °C*. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 94-4045. Reston, Virginia. 85 p.
- Kipp, K.L., Hsieh, P.A., & Charlton, S.R. (2008). *Guide to the Revised Ground-Water Flow and Heat Transport Simulator: HYDROTHERM, Version 3. Techniques and Methods*. 6-A25. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. 178 p.
- Rojstaczer, S.A., Ingebritzen, S.E., & Hayba, D.O. (2008). Permeability of continental crust influenced by internal and external forcing. *Geotitles*, (8), 128—139. doi: 10.1111/j.1468-8123.2008.00211.x.