

# СВЯЗЬ ПОРИСТОСТИ И ДИФФУЗИОННОЙ ИЗВИЛИСТОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ МИКРОТОМОГРАФИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИФФУЗИИ В ПОРОВОМ МАСШТАБЕ

## PORE-SCALE STUDY OF THE DIFFUSIONAL TORTUOSITY IN LOW PERMEABLE SOILS ACCORDING TO MICROTOMOGRAPHY DATA AND DIFFUSION SIMULATION

### ЛЕХОВ В. А.

Аспирант кафедры гидрогеологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, v.lekhov@gmail.com

### ПОЗДНЯКОВ С. П.

Заведующий кафедрой гидрогеологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., профессор, г. Москва, sppozd@geol.msu.ru

### ДЕНИСОВА Л. Г.

Аспирантка кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, milabull@mail.ru

### Ключевые слова:

извилистость; диффузия; микротомография; моделирование диффузии; закон Арчи.

### Аннотация

В работе рассмотрен способ определения коэффициента диффузионной извилистости путем моделирования диффузии в поровом масштабе на микроструктурах пород и исследована взаимосвязь между извилистостью и пористостью. Исследование микроструктуры проводилось рентгеновским микротомографом на слабопроницаемых глинистых отложениях. Съёмка выполнялась на образцах ненарушенного сложения с выделением элемента размером  $0,91^3$  мм ( $700^3$  вокселей). После бинаризации полученных структур выполнялся корреляционный анализ для определения элементарного представительного объема, по которому производилось деление на матрицы-врезки для дальнейшего моделирования. Полученные вариограммы показали, что пространственная корреляция значительно меньше, чем длина матрицы-врезки. Для полученных матриц-врезок проводилось численное моделирование путем решения уравнения Лапласа с двоичными коэффициентами. По графикам зависимости коэффициента эффективности диффузии от пористости определены показатели степени (показатель цементации) в диапазоне от 1,9 до 2,3. Также выявлена анизотропия извилистости в горизонтальном и вертикальном направлениях.

### LEKHOV V. A.

Postgraduate student of the Department of Hydrogeology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, v.lekhov@gmail.com

### POZDNIAKOV S. P.

Head of the Department of Hydrogeology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), professor, Moscow, sppozd@geol.msu.ru

### DENISOVA L. G.

Postgraduate student of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, milabull@mail.ru

### Keywords:

tortuosity; diffusion; microtomography; diffusion simulation; Archie's law.

### Abstract

In this paper we obtained tortuosity values in pore scale diffusion simulation for the studied soil microstructure and examined relationship between tortuosity and porosity. We studied the microstructure with X-ray microtomograph from borehole cores of low-permeable silt-clay formation. Shooting performed on undisturbed microsamples of size  $0,91^3$  mm ( $700^3$  vox). After binarization of each obtained 3-D structure, its spatial correlation analysis was performed. This analysis showed that the spatial correlation scale of the indicator variogram is considerably smaller than microsample length. Then there was the numerical simulation of the Laplace equation with binary coefficients for each microsamples. The results were analyzed in the form of graph of tortuosity versus porosity. Pore-scale simulations show nonlinear decreasing of tortuosity with decreasing of porosity. Fitting this graph by Archie's model we found exponent value in the range between 1,9 and 2,3. Anisotropic of tortuosity also detected in horizontal and vertical directions.

## Введение

Диффузионный массоперенос может преобладать над конвективным в условиях низких скоростей потока подземных вод, например, в глинистых отложениях. Такая ситуация характерна для полигонов глубоинной изоляции жидких радиоактивных отходов (ЖРО), где перенос через слабопроницаемые отложения, отделяющие зону закачки отходов от вышележащей части гидрогеологического разреза, во многом определяет возможности захоронения [5, 19]. Учитывая повышенную опасность таких объектов, оценка роли и масштаба диффузионного переноса в глинистых отложениях является актуальной проблемой.

Получение достоверных значений коэффициентов диффузии требует либо достаточно продолжительных лабораторных опытов, либо уникальной информации мониторинга объектов загрязнения, связанной с анализом *in situ* распределения мигранта в слабопроницаемых отложениях. Поэтому большинство исследователей используют значения для пород-аналогов, приведенных в литературе, или применяют эмпирические (полуэмпирические) и теоретические модели, связывающие коэффициент диффузии в пористой среде с его значением в свободном водном растворе и пористостью среды.

Однако коэффициент диффузии для слабопроницаемых отложений, полученный в результате экспериментальных определений разными авторами, различается на четыре порядка: от  $8,64 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/сут [20] до  $0,25 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/сут [1], что показывает необоснованность использования для прогнозного моделирования миграции значений этого параметра, основываясь только на литературных данных.

Идея использования теоретических моделей связи пористости и коэффициента диффузии пористой среды основана на общем подходе поиска эффективных параметров для законов переноса, в которых поток пропорционален градиенту потенциала, умноженному на локальный коэффициент, зависящий от свойств среды в данной точке. При этом эффективные параметры – коэффициенты уравнения Лапласа для гомогенной фиктивной среды ищутся из условия равенства среднего потока в фиктивной среде среднему потоку в неоднородной среде. Классическим примером таких исследований, начиная еще с работ Д.К. Максвелла, является анализ сред с включениями. Для поиска эффективного коэффициента пористой среды такой анализ может быть проведен при рассмотрении гранулярной модели, в которой твердая фаза породы схематизируется как непроницаемые включения в водном растворе, заполняющем поры. Однако при подобном анализе для получения аналитических зависимостей обычно упрощается форма включений (шар, эллипсоид) и никак не учитывается важный геометрический параметр среды – связность пор. Как результат, подобные зависимости могут предсказать связь коэффициентов диффузии и пористости только при достаточно малой концентрации включений, то есть при большой пористости. При малых значениях пористости применение такого подхода может привести к неоднозначным или к

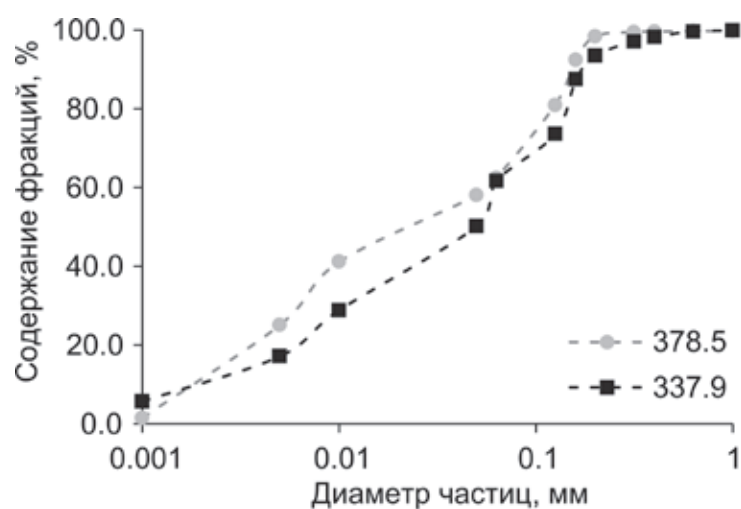
нефизичным результатам. Так, например, для шаровых включений использование самосогласованного подхода дает критическую долю проводящей среды, при которой заканчивается перенос 0,33, в то время как теория перколяции дает это значение равным около 0,16 [17], а в реальных пористых средах за счет связности пор перенос происходит и при меньшей доле проводящей среды – пористости. Другой способ получения теоретических расчетных зависимостей – использование капиллярных моделей, то есть моделей проводящих пучков капилляров в непроницаемой матрице. Простейшая модель капиллярной среды представляет собой набор беспорядочно ориентированных бесконечных капилляров [10, 16].

Наибольшую популярность имеют эмпирические модели, связывающие эффективные параметры переноса и пористость породы. Первой такой моделью стал степенной закон Арчи [8], основанный на аппроксимации данных об электропроводности насыщенных флюидами пористых сред. Следует отметить, что попытки теоретически обосновать эту модель пока безуспешны. Поэтому такие модели содержат эмпирические параметры, которые необходимо определять для изучаемой породы индивидуально.

В последнее десятилетие в мире, и России в частности [2, 6], растет объем публикаций, связанных с получением эффективных параметров процессов переноса тепла, фильтрации жидкостей и др., основанных на микротомографии реальных образцов с последующим использованием трехмерной структуры неоднородности.

Учитывая математическую аналогию между законами Фика и Ома, авторы статьи предлагают методику получения эмпирических коэффициентов модели Арчи для индивидуальных типов отложений, основываясь на данных микротомографических исследований структуры образцов и численного моделирования диффузионного переноса в полученных структурах.

Методика была опробована на двух образцах, приуроченных к слабопроницаемым отложениям полигона глубоинного захоронения Сибирского химического комбината [5]. По номенклатуре средне-



**Рис. 1. Интегральные кривые гранулометрического состава исследуемых образцов**

грубообломочных и глинистых пород смешанного гранулометрического состава В.Т. Фролова [7] образцы характеризуются как алевритоглинистая порода (рис. 1). Рентгеноструктурный анализ показал, что содержание первичных минералов (кварц, калиевый полевой шпат (КПШ) и т.д.) составляет около 50 %, среди глинистых минералов, на долю которых приходится от 35 до 50 %, преобладают каолинит и гидрослюды, смектиты занимают подчиненное положение. Глубина отбора образцов 330–380 м.

### Теоретическое представление

Диффузия представляет собой процесс, вызванный Броуновским движением ионов или молекул под действием градиентов концентрации, температуры, концентрации или давления. Одномерный диффузионный поток  $J$ , проходящий через единичную площадь поперечного сечения в пористой среде при постоянных температуре и давлении, описывается законом Фика [3]:

$$J = -D \frac{dC}{dx}, \quad (1)$$

где  $dC/dx$  – градиент концентрации мигранта (отрицательный в направлении диффузии),  $C$  – концентрация мигранта в растворе,  $x$  – расстояние,  $D$  – коэффициент диффузии в пористой водонасыщенной среде. Переход от коэффициента диффузии в сплошной среде  $D_0$  к коэффициенту диффузии в пористой среде  $D$  обычно выражается [13]:

$$D = D_0 n_a \chi \delta = \varphi D_0, \quad (2)$$

где  $n_a$  – активная пористость,  $\chi$  – коэффициент извилистости,  $\delta$  – коэффициент подвижности диффузии (вводится для пород, в которых присутствуют частицы диаметром менее 1 мкм [13]),  $\varphi$  – коэффициент эффективности диффузии в пористой среде. По литературным данным коэффициент эффективности диффузии  $\varphi$  меняется от 0,02 в слабопроницаемых отложениях [9] до 0,2 в гранулярных породах [4]. Коэффициент извилистости ( $\chi < 1$ ) – параметр, отражающий геометрию пор, и выражается [12]:

$$\chi = \left( \frac{L}{L_K} \right)^2, \quad (3)$$

где  $L$  – кратчайшее расстояние между двумя точками

вдоль направления массопереноса,  $L_K$  – среднее расстояние при движении по поровым каналам с учетом их извилистости между этими точками.

Выражение (3) применимо для гомогенных, изотропных поровых сред [11]. В работе [16] показано, что в поровых средах с переменными диаметрами пор, коэффициент извилистости может принимать аномально малые значения.

В реальных поровых средах не соблюдается гомогенность и изотропность, поэтому вычисляют коэффициент эффективности, который включает в себя и пористость, и коэффициент извилистости (3). Коэффициент обычно выражается эмпирической зависимостью:

$$\varphi = An^m \quad (4)$$

где  $A$  и  $m$  – эмпирические параметры, зависящие от геометрии пор. Иногда параметр  $m$  называют показателем цементации осадочных пород [13]. Характерные значения  $m$  варьируют в диапазоне от 1,8 до 2,4 для уплотненных пород [8], и около 1,3 для несцементированных отложений. Также принято считать, что при пористости  $n < 0,2$  показатель  $m \geq 2$ . Параметр  $A$  обычно равен 1 [11], что также не нарушает физического смысла, при пористости, равной 0, извилистость равна 0.

Данная зависимость получена на основе упомянутого выше эмпирического закона Арчи для расчета удельного электрического сопротивления породы  $\rho$  в зависимости от удельного сопротивления раствора  $\rho_0$  и подобия законов Ома и Фика [15]:

$$\rho = \rho_0 An^{-m} \quad (5)$$

Следует отметить, что, несмотря на математическую схожесть формулировки законов Ома и Фика, параметр  $m$  не обязательно одинаков в уравнениях (4) и (5), так как диффузионная извилистость может не совпадать с электрической извилистостью.

### Микротомографические исследования

Современным методом получения трехмерной микроструктуры пород является рентгеновская компьютерная микротомография (μКТ), позволяющая с высоким разрешением получать информацию о форме и размере частиц, слагающих породу, и структуре порового пространства, не нарушая целостности образца.

В основе метода лежит сигнал, который несет информацию о структуре в виде искажения параметров рентгеновских лучей при их взаимодействии с веществом исследуемого объекта. В результате обработки полученных сигналов каждому вокселю (аналог двухмерного пиксела для трехмерного пространства) некоторой объемной матрицы присваивается определенное численное или цветовое значение (обычно оттенки серого цвета), характеризующее так называемую «рентгеновскую плотность». Рентгеновская плотность отражает относительный коэффициент поглощения в соответствующей точке образца и определяется, главным образом, плотностью и химическим составом вещества. При анализе сложной

Таблица 1

Результирующие бинарные матрицы			
Название образца	Значения пористости при разных уровнях бинаризации		
	$n_{min}$ , Д.е.	$n_{real}$ , Д.е.	$n_{max}$ , Д.е.
337.9	0,056	0,13	0,30
378.5	0,10	0,28	0,38

структуры измерение «рентгеновской плотности» не всегда позволяет с точностью утверждать, какое вещество при этом визуализируется. Обычно можно выделить участки образца разной плотности (в простейшем случае частицы и поры).

Микротомографическая съемка производилась, на двух образцах ненарушенного сложения размером  $3 \times 3 \times 3 \text{ мм}^3$ . В результате съемки получены наборы из 700 изображений с разбиением каждого изображения  $700 \times 700$  пикселей. Физически размер отснятых образцов составил  $0,91 \times 0,91 \times 0,91 \text{ мм}^3$ , при этом размер одного вокселя соответствовал  $0,00133 \text{ мм}^3$ .

Для дальнейшей работы с объемной матрицей данных ее необходимо привести к бинарному виду, однозначно разделив твердый скелет и поровое пространство образца. Наиболее сложным вопросом является выбор порогового уровня бинаризации. Воксели из-за конечного размера и кубической формы не отражают реальной границы раздела фаз. Естественные среды часто обладают неоднородностью строения в пределах одного вокселя, то есть, размер структурных элементов меньше разрешающей способности метода. Большинство вокселей на таких изображениях обычно содержит несколько фаз и имеют осредненную рентгеновскую плотность. Поэтому граница раздела фаз имеет плавный переход и не может быть установлена однозначно.

Авторы использовали три пороговых уровня бинаризации: наиболее близкий к реальной границе раздела фаз, а также заниженный и завышенный (рис. 2). Таким образом, были получены три схожие по микростроению матрицы с разными значениями общей пористости, для возможности построения эмпирических зависимостей, отображающих почти весь диапазон пористости для осадочных пород.

Полученные наборы черно-белых растровых изображений в формате .bmp переводились в матрицу индикаторной функции  $I(x, y, z)$ , состоящую из нулей и единиц, причем  $I = 1$ , если данная точка с координатами  $x, y, z$  попадает в пору и  $I = 0$ , если в скелет породы. Конвертирование осуществлялось считыванием каждого пикселя изображения, определения его битности и присвоением ему 0 или 1,

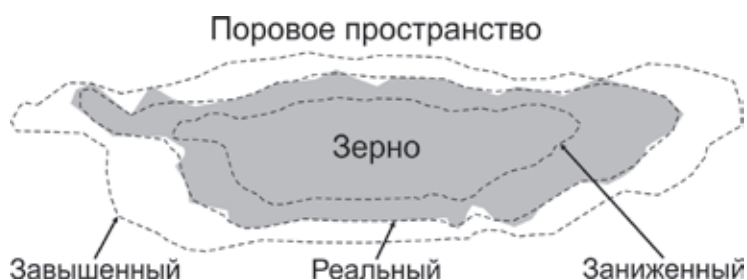


Рис. 2. Три пороговых уровня бинаризации

согласно таблице цветов (палитре) для формата .bmp. В результате получено шесть матриц индикаторной функции  $I(x, y, z)$  для двух образцов. Очевидно, что математическое ожидание индикаторной функции есть среднее значение пористости данного образца при данной выбранной границе бинаризации. Результаты расчета пористости для трех границ бинаризации приведены в табл. 1.

### Корреляционный анализ микроструктуры

По полученным трехмерным матрицам микроструктуры (рис. 3, а) выполнялся корреляционный анализ, путем построения индикаторных вариограмм по трем направлениям в программном комплексе SGeMS [18], для определения характерного масштаба пространственной корреляции бинарной структуры исследуемых образцов. Такой анализ позволяет выделить элементарный представительный объем (REV) отобранных образцов, характеризующийся расстоянием, на котором индикаторные вариограммы выходят на плато.

Построенные индикаторные экспериментальные вариограммы по трем ортогональным направлениям (X, Y, Z) аппроксимировались теоретическими экспоненциальными вариограммами, которые показали (рис. 3, б) небольшую анизотропию микроструктуры в горизонтальном (X, Y) по отношению и к вертикальному (Z) направлению. Вариограммы для направлений X и Y схожи, что свидетельствует об

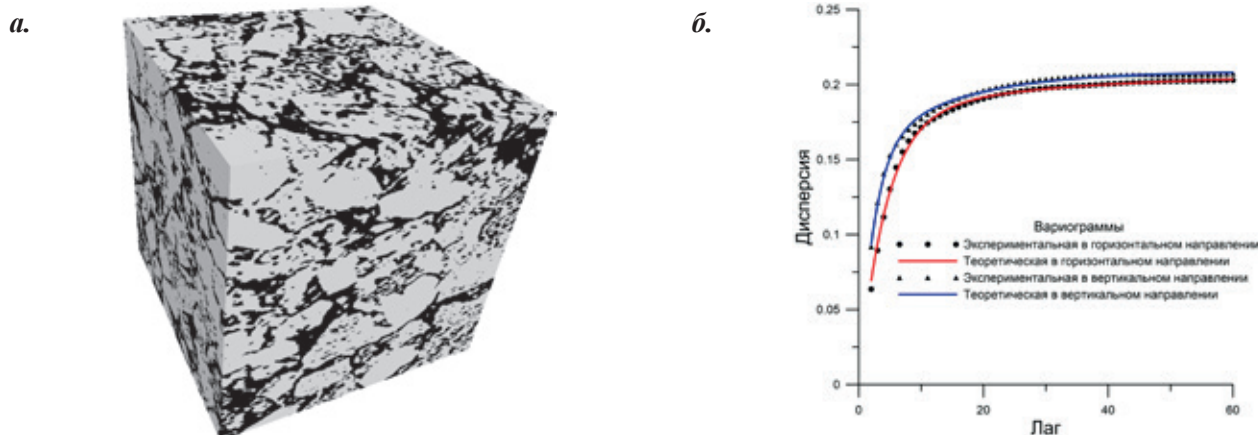


Рис. 3. Трехмерная матрица микроструктуры для образца 378.5 (черный цвет – поровое пространство, серый цвет – скелет породы) (а); экспериментальные и теоретические индикаторные вариограммы для образца 378.5 (б)

отсутствии анизотропии в плане. Характерный масштаб корреляции исследуемой структуры составил 18 вокселей для горизонтального (X, Y) и 16 вокселей для вертикального (Z) направлений, то есть REV среды для данного образца примерно равен  $18^3$  вокселей.

Учитывая полученное значение REV для моделирования диффузии выбран минимальный объем бинарной структуры, на порядок превышающий REV:  $175 \times 175 \times 175$  воксел. Это позволило «разрезать» каждую общую трехмерную матрицу микроструктуры на  $4^3 = 64$  матрицы врезки. Осреднение индикаторной функции для каждой врезки дает среднее значение общей пористости  $n$  в ней.

### Моделирование диффузионного переноса

Для оценки эффективных коэффициентов диффузии для каждой матрицы-врезки использовалась модель стационарного диффузионного переноса в среде с бинарными коэффициентами диффузии:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D(x, y, z) \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D(x, y, z) \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D(x, y, z) \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0 \quad (6)$$

где  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии,  $C$  – концентрация,  $x, y, z$  – координаты.

Величина коэффициента диффузии в блоке с координатами  $x, y, z$  задавалась по правилу:

$$\begin{aligned} I(x, y, z) = 1 : D = 1 \\ I(x, y, z) = 0 : D = 0,000001, \end{aligned} \quad (7)$$

Значение коэффициента диффузии скелета принималось не нулевым, а бесконечно малым по отношению к коэффициенту диффузии в порах для того, чтобы эффекты экранирования изолированных участков пор скелетом не приводили к нарушениям численного решения уравнения (6).

Моделирование стационарного диффузионного переноса для определения эффективных коэффициентов

диффузии для каждой матрицы-врезки выполнялось по трем направлениям X, Y и Z (рис. 4), задавая в одном направлении постоянный градиент, а в остальных двух направлениях непроницаемые границы. Общее количество геомиграционных моделей, для которых производился расчет диффузионного переноса,  $64 \times 3 = 192$  для одного образца.

Для моделирования использовалась программа MODFOW-2005, позволяющая решать уравнение Лапласа (6) с неоднородными коэффициентами на сетках большой размерности с использованием устойчивого многосеточного солвера GMG [14]. В качестве граничного условия на одной из границ концентрация мигранта задавалась  $C(0) = 0$ , а на противоположной границе  $C(l) = 1$  (в зависимости от направления моделируемого диффузионного потока  $l$  равно X, Y или Z). Остальные границы моделей задавались непроницаемыми.

Результатом моделирования для каждой модели врезки служил массовый расход между границами с заданными концентрациями, по которому определялся эффективный коэффициент диффузии поровой среды как:

$$D_{ef} = Q / (FI) \quad (8)$$

где  $Q$  – массовый расход через модель,  $F$  – площадь поперечного сечения,  $I$  – градиент концентрации.

Так как в модели использовались безразмерные коэффициенты диффузии, то, полагая, что коэффициент диффузии в порах  $D$  равен коэффициенту диффузии в растворе  $D_0$ , согласно зависимости (2), эффективный коэффициент диффузии поровой среды равен коэффициенту эффективности диффузии, по которому можно рассчитать и коэффициент извилистости, путем деления коэффициента эффективности на среднее значение пористости для данной матрицы.

### Результаты и обсуждение

Для каждого образца строились графики (рис. 5, а; б) зависимости расчетного коэффициента

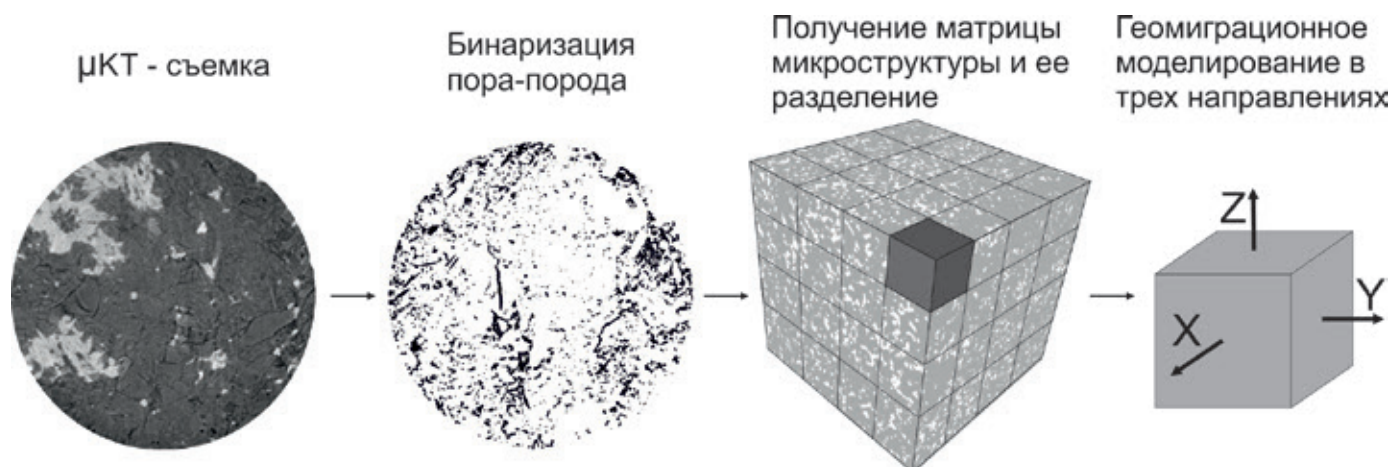
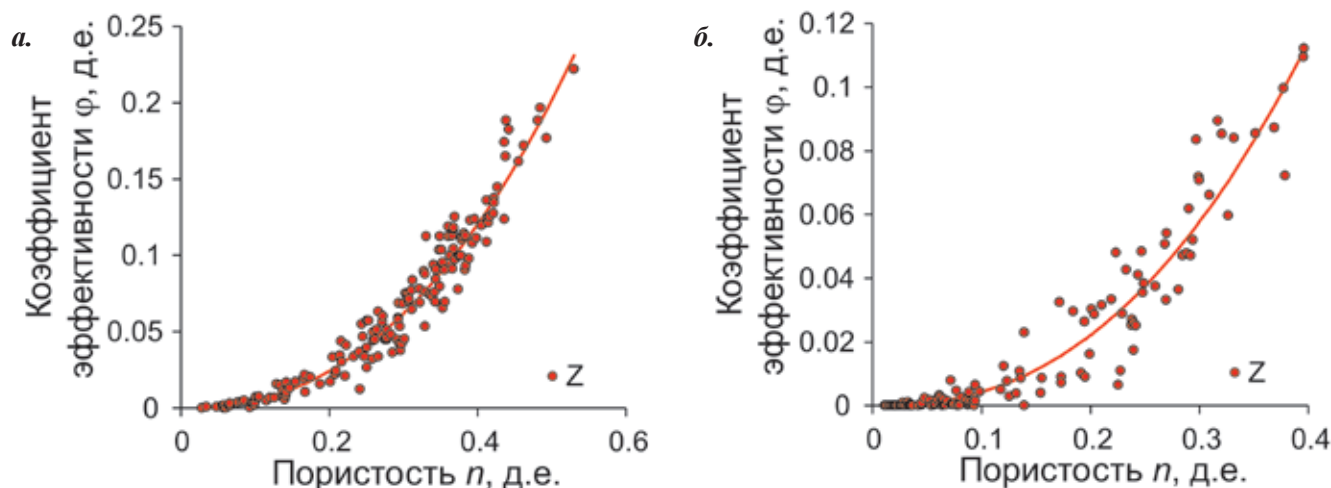
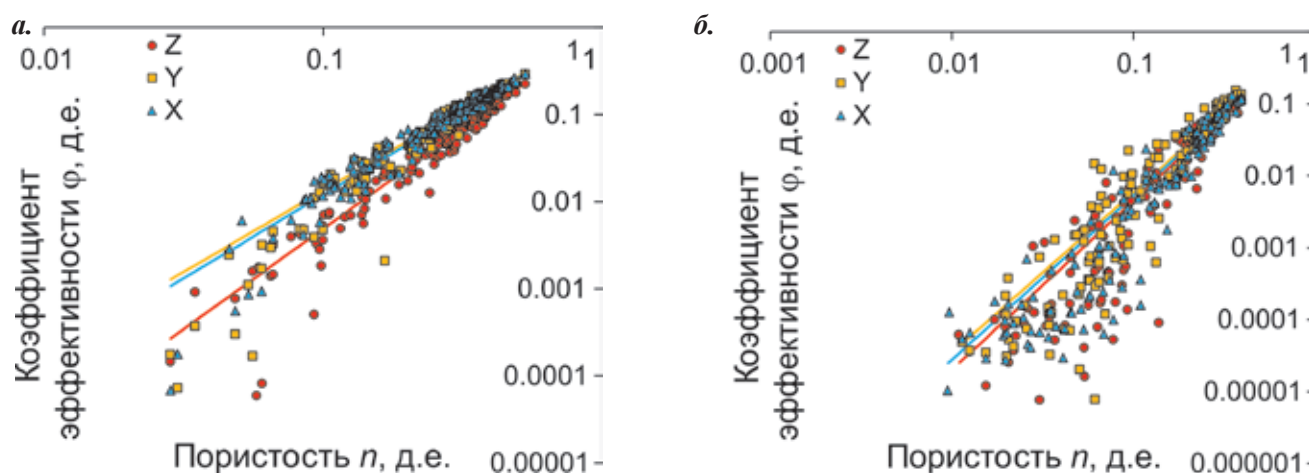


Рис. 4. Общая последовательность действий для определения коэффициента извилистости



**Рис. 5. Зависимости коэффициентов эффективности от пористости в направлении Z и подобранные эмпирические кривые: а – для образца 378.5; б – для образца 337.9**



**Рис. 6. Зависимости коэффициентов эффективности от пористости в разных направлениях и подобранные эмпирические кривые в билогарифмических координатах: а – для образца 378.5; б – для образца 337.9**

эффективности от общей пористости модели для этой модели. Далее, для полученных зависимостей строились теоретические кривые, путем подбора параметра цементации осадочных пород  $m$  (табл. 2), а параметр  $A$  фиксировался равным 1. Также для более точной диагностики строились графики в билогарифмических координатах (рис. 6, а; б). На таком графике экспериментальные данные должны аппроксимироваться прямой линией.

Подобранные теоретические кривые хорошо описывают данные численного моделирования и показывают нелинейное уменьшение произведения извилистости и пористости с уменьшением пористости, что хорошо согласуется с теоретическими представлениями. Определенные коэффициенты удовлетворяют данным, приведенным в литературных источниках, и лежат в диапазоне от 1,87 до 2,31.

Полученные кривые для образца 378.5 имеют четкую анизотропию в вертикальном и горизонтальном направлениях, что также подтверждается приведенным выше анализом индикаторных вариограмм. Для образца 337.9 столь четкое разделение не прослеживается, что свидетельствует о незначительной анизотропии по направлениям.

На графиках в билогарифмических координатах

отчетливо прослеживается нелинейная связь полученных значений при пористости меньше 0,01, что, вероятнее всего, связано с приближением к порогу перколяции для данного типа среды. Однако, учитывая, что такие малые значения пористости были

Таблица 2

Подобранные коэффициенты цементации осадочных пород		
Образец	Направление	Параметр $m$
337.9	X	2,28
	Y	2,23
	Z	2,35
378.5	X	1,92
	Y	1,87
	Z	2,31

получены для завышенной границы бинаризации данных микротомографии, судить о перколяционных эффектах, связанных именно с микроструктурой образцов по полученным данным достаточно сложно.

### **Заключение**

В данной работе приводится методика определения взаимосвязи между пористостью и диффузионной извилистостью слабопроницаемых глинистых отложений для дальнейшего расчета коэффициентов диффузии поровой среды, которые практически невозможно определить экспериментальным способом. Полученные эмпирические коэффициенты определены по трем направлениям X, Y (по напластованию) и Z (перпендикулярно напластованию) и попадают в диапазон значений для слабопроницаемых отложений, приведенных в литературных источниках, и варьируют от 1,9 до 2,3.

Исследуемые образцы имеют анизотропию извилистости в горизонтальном и вертикальном направлениях, хотя образец 337.9 более изотропен, чем образец 378.5.

Важно отметить, что диффузионная извилистость, полученная таким методом, имеет объемный характер, что дает более точные представления, чем плановая извилистость, определенная по РЭМ-изображениям.

Дальнейшие исследования необходимо направить на сравнение полученных данных с экспериментально определенными коэффициентами диффузии для этих же или аналогичных отложений. Кроме того, разрешающая способность томографа позволила получить модели микроструктуры с порами размером более 1 мкм. Повышение точности съемки позволит выделить тонкие межчастичные микропоры (<1 мкм), наличие которых, вероятно, увеличит диффузионную извилистость, тем самым рассчитанные коэффициенты диффузии поровой среды будут меньше, чем реальные.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00409 А и с использованием рентгеновского компьютерного микротомографа TDM 1000H – II, полученного геологическим факультетом в рамках реализации Программы развития МГУ им. М.В. Ломоносова.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. 160 с.
2. Карсанина М.В. Моделирование и реконструкция структуры и свойств пористых сред с помощью корреляционных функций: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / М.В. Карсанина. М.: ИДГ РАН, 2016. 28 с.
3. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика: учебник. М.: КДУ, 2010. 500 с.
4. Рошаль А.А. Методы определения миграционных параметров. М.: Обзор ВИЭМС. Серия «Гидрогеол. и инж. геол.», 1980. 62 с.
5. Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. 256 с.
6. Свительман В.С. Разработка математических моделей и методов описания микроструктуры горных пород средствами теории случайных полей: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / В.С. Свительман. М.: МФТИ, 2014. 20 с.
7. Янакурт О.В. Литология: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2008. 336 с.
8. Archie G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Technology* 1, 1942. P. 55–62.
9. Barone F.S., Rowe R.K., Quigley R.M. Estimation of chloride diffusion coefficient and tortuosity factor for mudstone. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 119, № 7, 1992.
10. Bhatia S.K. Directional autocorrelation and the diffusional tortuosity of capillary porous media. *Journal of Catalysis* 93, 1985. P. 192–196.
11. Boving T.B., Grathwohl P. Tracer diffusion coefficients in sedimentary rocks: correlation to porosity and hydraulic conductivity. *Journal of Contaminant Hydrogeology*, 53:85-100, 2001.
12. Epstein N. On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media. *Chem. Eng. Sci.*, № 44 (3), 1989. P. 777-779.
13. Grathwohl P. Diffusion in natural porous media: contaminant transport, sorption/desorption and dissolution kinetics. Kluwer Academic Publishers; 1998. 207 p.
14. Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. Modflow-2000, the U.S. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. U.S. geological survey, 2010. 127 p.
15. Klinkenberg I.J. Analogy between diffusion and electrical conductivity in porous rocks.- *Geol. Soc. Am. Bull.*, № 62, 1951. P. 559–563 p.
16. Petersen E.E. Diffusion in a pore of varying cross section. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 4, 1958. P. 343–345 p.
17. Pozdniakov S.P., Tsang C.F. A self-consistent approach for calculating the effective hydraulic conductivity of a binary, heterogeneous medium. *Water Resources Research*. 2004. Vol. 2004, no. № 5.
18. Remi N. Geostatistical Earth Modeling Software. User manual. Stanford University, 2004.
19. Shestakov V.M., Kuvaev A.A., Lехov A.V., Pozdniakov S.P., Rybalchenko A.I., Zubkov A.V., Davis P.A. and Kalinina E.A. Flow and transport modeling of liquid radioactive waste injection using data from the siberian chemical plant injection site. *Environmental geology*, № 42(2-3), 2002. P. 214–221.
20. Xiang Y., Al T., Scott L., Loomer D. Diffusive anisotropy in low-permeability Ordovician sedimentary rocks from the Michigan Basin in southwest Ontario. *Journal of contaminant hydrology*, № 155, 2013. P. 31–45