

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор — начальник управления
научной политики и организации
научных исследований МГУ имени

М.В.Ломоносова д.ф.-м.н,
профессор А.А. Федянин.



“ декабрь ” 2014

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Свительман Валентины Семеновны
“РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ
ОПИСАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД СРЕДСТВАМИ
ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ”, представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18

Актуальность темы выполненной работы и ее связь с проблемами геофильтрации флюидов и переноса растворенных в них веществ. Диссертационное исследование В.С. Свительман направлено на решение фундаментальной проблемы – предсказания макроскопических параметров природных пористых сред, определяющих процессы фильтрации флюидов и переноса растворенных веществ и энергии на основе данных о микроскопическом строении этих сред. Проблема нахождения макроскопических параметров, используемых в моделях сплошных сред по микроскопическим характеристикам пористых сред имеет достаточно долгую историю. Она восходит к классическим работам Козени, Кармана, Ромма, Николаевского, Ентова и других авторов, применявших простейшие гранулярные или капиллярные микромоделю для нахождения макроскопических параметров проницаемости и дисперсивности пористых и трещиноватых сред. В последнее десятилетие в связи с развитием рентгеновской микротомографии, позволяющей создать трехмерную модель реального образца горной породы, а не использовать идеализированные

капиллярные и (или) гранулярные модели, оценка макроскопических параметров по данным о микростроении становится важнейшим направлением исследований и анализа кернового материала. Об этом свидетельствует заметный рост публикаций на данную тематику в последнее десятилетие в журналах, так или иначе связанных с проблемой фильтрации и переноса в природных пористых средах, таких как Math. Geosciences, Water Res. Res., SPE Formation Evaluation, Journal Geophysical Res. и др. При этом из-за сравнительной новизны метода получения трехмерных микромоделей образцов горных пород в настоящее время еще не сложились стандарты обработки и анализа микротомограмм, в том числе и методы описания и моделирования микроструктуры, развиваемые в рецензируемой работе.

Новизна исследования полученных результатов, выводов и рекомендаций. В работе В.С. Свительман для описания микроструктуры горных пород на основе микротомографических данных впервые систематически используется аппарат геостатистики. Автором в рамках модели бинарной среды (твердая фаза породы – поровое пространство) применены индикаторные случайные функции, позволяющие в рамках двухточечного корреляционного приближения описать пространственную изменчивость системы "твердая фаза-поровое пространство".

Поскольку геостатистические методы, чрезвычайно широко используются в науках о Земле для описания пространственной изменчивости именно макропараметров (проницаемости, проводимости, фациальной изменчивости и др.), а опыт их использования при исследовании микрообъектов невелик, автору потребовалось выполнить адаптацию этих методов к проблеме анализа рентгеновских микромоделей горных пород. При этом ею совершенно справедливо выделены два ключевых направления упомянутой адаптации:

- a) Оценка микроанизотропии горных пород
- b) Оценка характерных корреляционных масштабов микроструктуры

Следует отметить, что выбор именно этих направлений для исследования и описания результатов микротомографии образцов горных пород представляется обоснованным и практически важным, так как и микроанизотропия и корреляционный масштаб (масштабы при иерархическом строении) существенно влияют на макроскопические параметры фильтрации и переноса. При этом, публикаций, в которых предложены методы и алгоритмы оценки микроанизотропии и корреляционных масштабов по данным микротомографии мы не нашли в доступной нам литературе.

Для оценки микроанизотропии автором впервые разработан алгоритм и соответствующее программное обеспечение, основанные на свойствах разложения поля вариограммы по сферическим гармоникам. При этом нулевая гармоника дает оценку изотропного радиуса корреляции, а вторая (и более высокие четные гармоники) дают оценки анизотропии. По-видимому в рамках геостатистического подхода это сделано впервые в рецензируемой работе.

Для оценки пространственных масштабов корреляции автором предложен и программно реализован метод спектрального преобразования ковариационной функции, с последующим разложением непрерывного спектра по экспонентам или Гауссовским функциям, позволяющим оценить характерные корреляционные длины. Несмотря на то, что взаимная связь спектральной и корреляционной функции широко используется при анализе случайных геостатистических полей, в контексте задач данной работы, это сделано и доведено до количественной методики, впервые.

В результате адаптации методов геостатистики к анализу микростроения в рецензируемой диссертации разработана методика количественного анализа и выполнена ее программная реализация на основе оригинальных алгоритмов и программ. Автором предложена оригинальная система верификации упомянутых алгоритмов и программ основанная на

выполнении анализа искусственной 3-D структуры “образца” с заранее известными заданными свойствами. Результаты анализа таких образцов и реальных образцов осадочных пород, приведенные в главе 5 показывают, что разработанные алгоритмы и программы корректно работают, то есть автором впервые, по крайней мере в нашей стране, создан и верифицирован программный комплекс для анализа 3-D микротомограмм горных пород.

Замечания по работе:

1. На наш взгляд для верификации методики оценки анизотропии и характерных масштабов микростроения следовало бы использовать большее количество искусственно сгенерированных сред, чем представлено в работе в главе 5. В частности, в дополнении к трем средам, изображенным на рис 8 следовало бы по крайней мере сгенерировать несколько моделей с эллиптическим порами разной анизотропии, разной ориентации эллипсоидов – вдоль основных осей, хаотически и разной их объемной доли. Это позволило бы более точно исследовать характер изменчивости вариограмм и возможности оценки пористости по плато вариограммы.
2. В таблице 2 указано, что пористость образца 4 равна $n=0.22$ и это же значение получено по асимптотике вариограммы, которая теоретически равна $n*(1-n)$ (зависимость 2.9 стр. 29). Однако на рис. 13а показано, только то, что асимптотика нулевого разложения вариограммы для этого образца равна 0.61. Целесообразно было бы для всех образцов привести рисунки самих вариограмм
3. Неудачно на наш взгляд введение мер анизотропии зависимостями 3.23-3.25. Для конечного пользователя было бы яснее в качестве мер анизотропии и для планарной и для линейной моделей использовать соотношение длин короткой и длинной осей эллипсоида.

Значимость полученных автором диссертации результатов. В результате проведенных автором исследований разработана количественная методика анализа 3-D микротомограмм, позволяющая описать неоднородность исследуемых образцов горных пород. Результаты применения данной методики на основе моделирования соответствующих процессов на микро уровне и последующей оценки эффективных макроскопических параметров сплошной среды позволят:

- Повысить достоверность оценки абсолютной и фазовой проницаемости горных пород с использованием высоко разрешимого моделирования движения флюидов в сгенерированной неоднородной среде, имеющей статистические характеристики, подобные характеристикам, полученным из анализа 3-D микротомограмм
- Оценивать коэффициенты диффузии и (или) гидродисперсии сплошной среды, имеющей микростроение подобное полученному из анализа 3-D микротомограмм
- Оценивать эффективную теплопроводность многофазной среды и связывать ее с микростроением

Кроме того, результаты геостатистического анализа 3-D микротомограмм могут быть использованы при классифицировании различных типов осадочных пород по микростроению, в частности глин и глинистых пород.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Наиболее эффективно результаты данной работы могут быть использованы в научных организациях и сервисных компаниях, занимающихся петрофизическими исследованиями керна для оценки проницаемости коллекторов на разведанных месторождениях нефти и газа и перспективных нефтегазоносных площадях (ВНИГНИ, Шлюмберже,

ВНИИГАЗ, РГУ нефти и газа им. Губкина и др.). Кроме того, разработанная методика анализа микростроения может быть использована для решения широкого круга геоэкологических задач, в которых требуется оценивать защитные свойства слабопроницаемых глинистых пород, в частности, используя отобранные образцы. В число таких организаций входит институт Геоэкологии РАН, Геологические факультеты Московского и Санкт-Петербургского университетов, ИГЕМ РАН и другие.

Таким образом, анализ работы В.С. Свительман по существу позволяет заключить, что в данная работа актуальна, в ней присутствует существенная научная новизна, ее результаты могут быть использованы при решении практически важных задач в области наук о Земле. Приведенные в отзыве замечания не влияют на общий положительный результат оценки данной работы. Реферат соответствует содержанию диссертации, а основные результаты отражены в опубликованных статьях.

Полагаем, что диссертационная работа В.С. Свительман соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Отзыв заслушан и утвержден на заседании кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, протокол № 6 от «22» декабря 2014 г.





Ученый секретарь кафедры гидрогеологии Муромец Н.Н.

Профессор кафедры гидрогеологии, д.г.м.н. Лехов А.В.

Зав. кафедрой гидрогеологии, д.г.м.н. Поздняков С.П.

Заместитель декана геологического факультета по научной работе, д.г.м.н. Вознесенский Е.А.

