Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 402-407 DOI: 10.31897/PMI.2020.4.2
И.П.Белозеров, М.Г.Губайдуллин

УДК 004.94:550.8

О концепции технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов на цифровой модели керна

И.П.БЕЛОЗЕРОВ ✉, М.Г.ГУБАЙДУЛЛИН
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова, Архангельск, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Белозеров И.П. О концепции технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов на цифровой модели керна / И.П.Белозеров, М.Г.Губайдуллин // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 402-407. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.2

Аннотация. Целью статьи является формирование концепции технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов методами математического моделирования на цифровой модели керна.
Цифровое моделирование керна применяется при оценке геологических запасов нефти. В статье представлена концепция технологии цифрового моделирования керна, позволяющая проводить качественные исследования по определению фильтрационно-емкостных характеристик пласта, включающая в себя моделирование порового пространства и фильтрационных процессов. Суть концепции состоит в том, что имитационная модель микроструктуры цифровой модели формируется на основе большого количества параметров, получаемых в ходе литолого-петрографических исследований шлифов, исследований шлама и геофизических исследований скважин.
Сформированная модель может быть использована в качестве основы для последующего моделирования фильтрационных процессов. Проводимость одиночных каналов сформированной модели может быть рассчитана при помощи методов молекулярной динамики, моделей решетчатых уравнений Больцмана и других математических моделей и методов.
На основании результатов проведенных исследований обосновано применение методов стохастической упаковки для моделирования структуры порового пространства цифровой модели керна терригенных коллекторов.
В связи с развитием компьютерных и нанотехнологий и использованием их в нефтегазовой промышленности решения, позволяющие получить адекватные результаты цифровых моделей керна, имеют высокую важность и актуальность для отрасли. Особенно важным представляется использование цифровых моделей керна при исследованиях сложных с точки зрения проведения физических экспериментов пород-коллекторов шельфовых месторождений западной части российской Арктики, нефтяных сланцев, пород, представленных рыхлыми слабосцементированными коллекторами и других.

***Ключевые слова*:** фильтрационно-емкостные свойства; терригенные коллекторы; математическое моделирование; цифровая модель керна; концепция технологий

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-29-15116 офи_м.

Введение. Исследования по определению фильтрационно-емкостных свойств являются неотъемлемой частью комплекса лабораторных исследований кернового материала пород-коллекторов нефти. Фильтрационно-емкостные свойства пород обусловлены комплексом литологических параметров, воздействующих на размер пор, способность вмещать и пропускать флюиды, их конфигурацию, расположение в породе, т.е. структуру порового пространства, и характеризуют промышленную ценность породы как коллектора [3].

У специалистов по лабораторным исследованиям кернового материала не всегда имеется достаточное количество керна со скважин для проведения исследований, в ряде случаев нет возможности отобрать керновый материал. Например, в случаях если керн с исследуемых скважин представлен рыхлыми, слабосцементированными и другими сложными с точки зрения проведения исследований породами. Иногда керн с исследуемых скважин и вовсе отсутствует [1]. С помощью цифровой модели керна появляется возможность эффективно уточнять и дополнять расчетные параметры фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов, получаемые в процессе лабораторных исследований керна, снижая вероятность ошибки в получаемых результатах.

В настоящее время технология цифрового моделирования керна является востребованным и развивающимся направлением при оценке геологических запасов нефти [4, 5, 7, 9]. В России тех-

нология цифрового моделирования керна находится на начальном этапе развития, первая лаборатория по цифровому моделированию керна была открыта в 2016 г. в технопарке «Сколково».

Анализ существующего состояния проблемы. Исследователями предпринимались различные подходы в оценке фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов на цифровых моделях керна. Так в работе [6] для моделирования пор и частиц образцов горных пород использовалась 3D-томография образцов керна и петрографических шлифов. В работе [8] для получения данных микроструктуры коллектора применялись 2048-воксельные томограммы и рентгенограммы терригенного коллектора.

Моделирование фильтрационных процессов, протекающих в пласте, в различных работах также производилось с использованием целого ряда математических моделей и методов расчета. К наиболее распространенным относятся модели поровых сетей, модель решеточных уравнений Больцмана, метод сглаженных частиц, модели диффузной границы, модели, основанные на решениях уравнений Навье – Стокса, методы конечных объемов [10].

Из-за отсутствия у данных методов явных преимуществ при сравнении в настоящее время не существует четкого представления о том, какие из моделей и методов являются наиболее подходящими для моделирования фильтрационных процессов на цифровой модели керна. Тем не менее, методы конечных объемов, используемые в работах [12, 15], и решеточных уравнений Больцмана, применяемые в работах [13, 14], наиболее часто используются для оценки свойств фильтрационных потоков в масштабе поры. Однако численные подходы, используемые в данных методах, снижают точность определения проницаемости, что было показано в работах [10, 11].

Исходя из вышеперечисленного, определено, что формирование эффективной концепции создания и функционирования технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов методами математического моделирования на цифровой модели керна является сложной, но очень актуальной исследовательской и прикладной задачей.

Концепция технологии цифрового моделирования керна. Авторами разработана концепция технологии цифрового моделирования керна, позволяющая определять фильтрационно-емкостные характеристики пласта методами математического моделирования с достаточной степенью точности. Суть концепции состоит в том, что имитационная модель микроструктуры цифровой модели работает на основе большого количества параметров, получаемых в ходе литолого-петрографических исследований шлифов и других исследований.

Очевидно, что наибольшую ценность цифровая модель керна представляет при полном отсутствии кернового материала. В таком случае в качестве материала для проведения исследований могут быть использованы образцы шлама с исследуемого коллектора, а также результаты геофизических исследований скважин.

Моделирование порового пространства модели. В процессе создания цифровой модели керна первоначально проводится генерация ее плотной стохастической упаковки для моделирования структуры. При этом, исходя из распределения размеров зерен горных пород, можно применить метод Монте-Карло и другие математические модели и методы, предназначенные для изучения случайных процессов. Размеры зерен и другие параметры создаваемой модели могут быть определены по результатам литолого-петрографических исследований шлифов и данным гранулометрического анализа горных пород методом лазерной дифракции или другими методами.

В дальнейшем для увеличения меры подобия создаваемой модели физическим образцам исследуемых коллекторов могут быть применены латентно-семантический анализ литолого-петрографических шлифов и другие методы уточнения геометрической структуры моделируемых зерен породы, а также их соответствия создаваемой модели.

Моделирование порового пространства должно осуществляться в несколько этапов. На первоначальном этапе создания структуры порового пространства проводится моделирование примитивов форм зерен (частиц). С учетом распределения частиц по размерам, полученного по результатам определения гранулометрического состава породы методом лазерной дифракции, литолого-петрографического изучения шлифов или другими методами, задается изображение каждому слою создаваемой модели. На рис.1 приведен пример литолого-петрографических шлифов, применяемых для задания изображений слоям модели. Результаты литолого-петрографического анализа шлифов:

Номер шлифа	Пористость шлифа, %	Размер зерен, мм	Сортировка	Краткое литологическое описание
1	10	0,22-0,40	Хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко- и среднезернистый с комбинированным цементом, пигментированный битумом, пористый. Текстура пятнистая, обусловлена неравномерной пигментацией битуминозных органических веществ (БОВ). Структура псаммитовая мелко- и среднезернистая
2	До 15	0,20-0,45	Хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко- и среднезернистый с комбинированным цементом, пигментированный битумом, пористый. Текстура пятнистая, обусловлена пигментацией БОВ, пористая. Структура псаммитовая мелко- и среднезернистая
3	10	0,15-0,35	Хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко- и среднезернистый с цементацией контактного типа (уплотнения), карбонатным цементом порового типа, редким кварцевым регенерационным цементом, пятнисто нефтенасыщенный. Текстура пятнистая, обусловленная неравномерным распределением карбонатного материала и БОВ
4	10-12	0,20-0,40	Средняя	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко- и среднезернистый с комбинированным цементом, неравномерно нефтенасыщенный. Текстура пятнистая. Структура псаммитовая мелко- и среднезернистая
5	10	0,25-0,40	Средняя	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко- и среднезернистый с комбинированным цементом, пигментированный битумом, пористый. Текстура пятнистая, обусловлена пигментацией БОВ. Структура псаммитовая мелко- и среднезернистая
6	10-12	0,22-0,35	Средняя	Песчаник олигомиктовый кварцевый мелко- и среднезернистый с цементацией контактного типа, участками с карбонатным цементом порового типа, пигментированный битумом. Текстура пятнистая. Структура псаммитовая мелко- и среднезернистая
7	10-15	0,15-0,32	Средняя	Песчаник олигомиктовый кварцевый средне- и мелкозернистый с цементацией контактного типа, регенерационным кварцевым цементом, локально с карбонатным цементом порового типа, пятнисто нефтенасыщенный. Текстура пятнистая, обусловлена неравномерным нефтенасыщением. Структура псаммитовая мелко- и среднезернистая
8	10	0,25-0,35	Хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый среднезернистый с цементацией контактного типа, спорадически с карбонатным цементом порового типа и кварцевым регенерационным цементом. Текстура пятнистая. Структура псаммитовая среднезернистая
9	10	0,25-0,40	Хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый среднезернистый с цементацией контактного типа, регенерационным кварцевым цементом, спорадически с хлорит-гидрослюдистым цементом пленочно-порового типа. Текстура пятнистая. Структура псаммитовая среднезернистая
10	10-12	0,22-0,40	Хорошая	Песчаник олигомиктовый кварцевый среднезернистый с комбинированным цементом, пигментированный битумом, пористый. Текстура пятнистая, обусловлена пигментацией БОВ. Структура псаммитовая среднезернистая

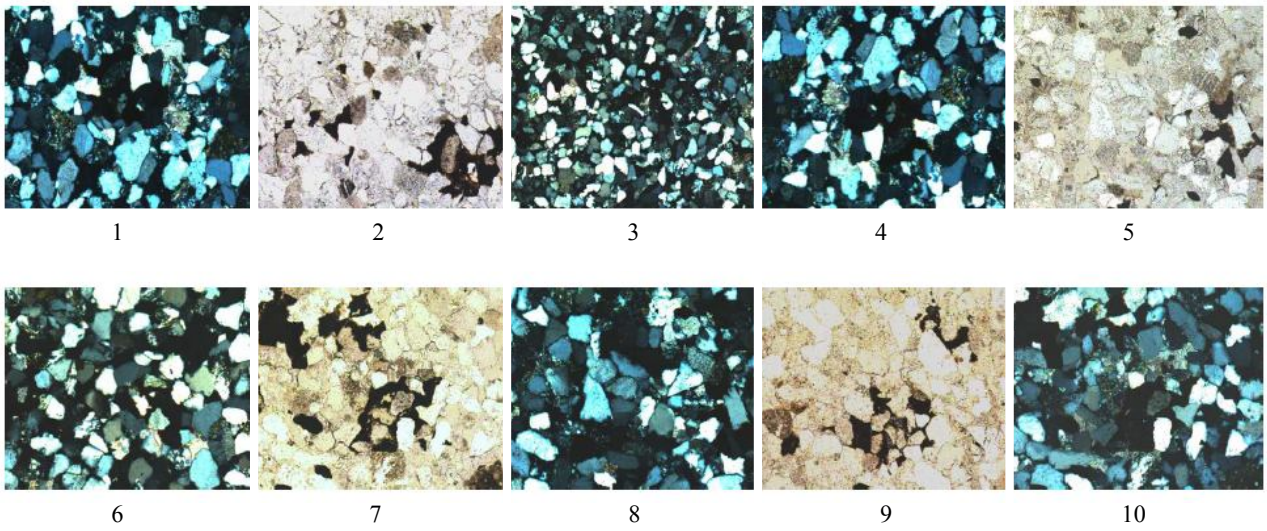


Рис.1. Фотографии литолого-петрографических шлифов, применяемых для задания изображений слоям модели

Важным этапом при реализации цифровой модели керна является учет глинистости моделируемых частиц при ее создании. Для этого на следующем этапе моделирования порового пространства необходимо производить калибровку создаваемых моделей по пористости с учетом коэффициентов глинистости. Содержание глинистых минералов, а также их состав и морфология существенно влияют на проницаемость терригенных коллекторов. Помимо этого глинистость оказывает влияние на нефтегазонасыщенность песчано-глинистых коллекторов [2].

На завершающем этапе указываются параметры физической модели, алгоритма калибровки и представления результатов.

Моделирование глинистости в цифровой модели керна может быть реализовано путем частичного заполнения микроструктуры цементами, проницаемость которых определяется посредством численных экспериментов молекулярной динамики и моделированием течений в микроканалах, а также с использованием других моделей и методов. Искомый коэффициент глинистости моделируемого коллектора при этом может быть определен в ходе геофизических исследований скважин методами собственных потенциалов или гамма-каротажа.

В дальнейшем по полученной структуре могут быть оценены коэффициенты открытой и полной пористости. При этом коэффициент полной пористости может быть оценен как отношение суммарного объема вокселей, свободных от смоделированных зерен породы (частиц), к объему всех вокселей пространства модели, а коэффициент открытой пористости, в свою очередь, может быть оценен как отношение объема вокселей, слагающих открытое сообщающееся пространство, свободное от смоделированных зерен породы (частиц), к объему всех вокселей пространства модели.

Моделирование фильтрационных процессов. Сформированная модель порового пространства может быть использована в качестве основы для последующего моделирования фильтрационных процессов. На данном этапе может быть рассчитана проводимость одиночных каналов созданной модели при помощи методов молекулярной динамики, моделей решетчатых уравнений Больцмана и других математических моделей и методов.

Решение задачи определения фильтрационных свойств цифровой модели керна следует начинать с определения абсолютной газопроницаемости модели. При ее определении на физических образцах керна производится фильтрация газа, инертного по отношению к среде, что значительно снижает влияние химических взаимодействий фильтруемой среды и глинистости пород. Оценка абсолютной газопроницаемости создаваемой цифровой модели керна может быть произведена с использованием методов электродинамической аналогии, конечных объемов и других математических моделей и методов.

Оценка фазовой проницаемости цифровой модели, а также проницаемости модели по нефти, керосину, воде, углеводородным газам и другим жидкостям и газам, не являющимся инертными, требует ввода поправочных коэффициентов, учитывающих химическое взаимодействие фильтруемых жидкостей и газов с породой. Вопрос получения данных коэффициентов является сложным и комплексным, так как горные породы, даже относительно подобные по своему вещественному составу, могут оказывать совершенно разное физико-химическое воздействие на значение проницаемости.

При моделировании рабочих процессов в создаваемой модели могут также использоваться различные аналитические зависимости, полученные на основании проведенного анализа результатов геофизических исследований скважин. В работе [1] был сделан вывод, что результаты геофизических исследований скважин для определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов при цифровом моделировании керна представляют значительный интерес, так как могут быть эффективно использованы при калибровке цифровой модели керна по пористости, глинистости и т.д. Авторами была установлена зависимость проницаемости по нефти, определенная на керновом материале, от пористости, определенной по результатам геофизических исследований (ГИС), для пяти скважин месторождений с терригенными коллекторами (рис.2).

Помимо этого интерес для цифрового моделирования керна представляют и другие показатели, определяемые в ходе геофизических исследований скважин. В работе [10], указано что значения электрического сопротивления пород, определяемые в ходе электрометрии скважин, могут быть использованы при определении проницаемости цифровой модели керна методом электродинамической аналогии как электрическое сопротивление цепи при замене сети микроканалов пористой среды на сеть связных электрических сопротивлений.

DOI: 10.31897/PMI.2020.4.2

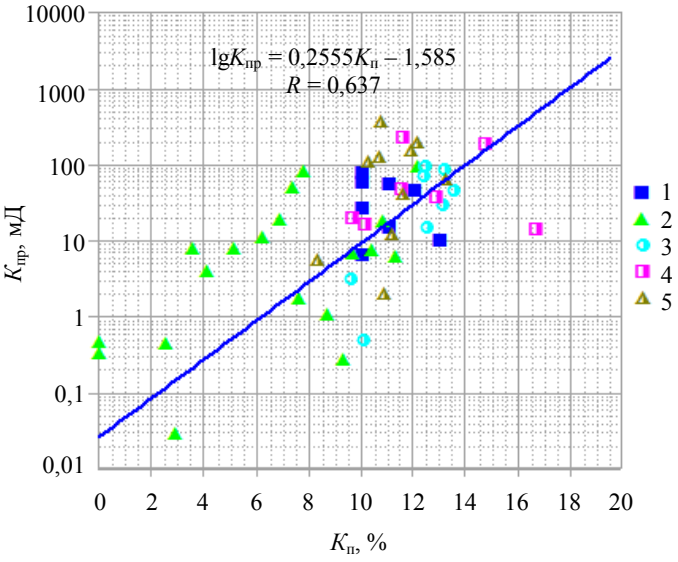


Рис.2. Зависимость проницаемости по нефти
$K_{пр}$ – коэффициент проницаемости по нефти (керн),
$K_{п}$ – коэффициент пористости (ГИС)

Обсуждения. Вопросы создания, совершенствования и успешного функционирования технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов методами математического моделирования на цифровой модели керна приводят к необходимости многомасштабного моделирования и нахождения решений целого ряда задач. Реализация данной технологии также может быть различной.

В силу высокой сложности численных процессов, имеющих место при проведении исследований по цифровому моделированию порового пространства и фильтрационных процессов, происходящих в нем, важно организовать последовательную работу различных программных пакетов таким образом, чтобы результат работы одного пакета являлся входными данными для работы последующего. В то же время на сегодняшний день не существует четкой систематизации форматов входных и выходных данных для работы подобного рода моделей, что часто требует от исследователей выполнения операций по конвертации или преобразованию форматов данных при помощи дополнительного программного обеспечения.

Автоматизация построения рабочих потоков, когда с помощью промежуточного программного обеспечения организуется последовательное выполнение задач и передача данных от одного программного пакета к другому, в ряде случаев позволила бы значительно сократить время проведения вычислительных экспериментов при цифровом моделировании керна.

Выводы

1. Предлагаемая концепция создания технологии определения фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов методами математического моделирования на цифровой модели керна основана на использовании большого количества экспериментальных данных, которые могут быть получены без использования кернового материала. К таким данным могут быть отнесены результаты геофизических исследований скважин, а также результаты определения гранулометрического состава горных пород, литолого-петрографического изучения шлифов и других исследований, которые получают при изучении шлама.

2. Технология определения позволяет производить адекватную оценку фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов. Однако действительная оценка эффективности и точности определения фильтрационно-емкостных свойств на цифровой модели керна, создаваемой с использованием тех или иных математических моделей и методов, может быть подтверждена только в ходе сравнения полученных экспериментальных данных по физическим образцам с результатами, полученными в ходе математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белозеров И.П.* Использование данных геофизических исследований скважин при создании цифровой модели керна терригенных коллекторов / И.П.Белозеров, М.Г.Губайдуллин // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики», 22-23 ноября 2018 г.; Пермский государственный исследовательский университет. Пермь, 2018. С. 52-55.

2. *Донцов К.М.* Разработка нефтяных месторождений. М.: Недра, 1977. 360 с.

3. *Трутнева М.А.* Оценка фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов Кряжевского месторождения по результатам гидродинамических исследований // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2005. № 6. С. 39-43.

4. *Al-Suwaidi M.H.* Application of Digital Core Description Methods in a Reservoir Characterisation Study: A Review of Traditional Versus Potential Future Methods / M.H.Al-Suwaidi, M.P.Williams, G.Ottinger // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 1-4 November 2010. Society of Petroleum Engineers. DOI: 10.2118/137963-MS

5. An Analysis of Sleeve Effects for Petrophysical Measurements using Digital Core Analysis / S.M.Alizadeh, S.Latham, J.Middleton, T.Senden, C.H.Arns // International Petroleum Technology Conference, 6-9 December 2015, Doha, Qatar. DOI: 10.2523/IPTC-18378-MS

6. Archie's exponents in complex lithologies derived from 3D digital core analysis / M.A.Knackstedt, C.H.Arns, A.P.Sheppard, T.J.Senden, R.M.Sok, Y.Cinar, W.V.Pinczewski, M.Toannidis, G.S.Padhy // 48th Annual Logging Symposium, 3-6 June 2007, Austin, Texas, USA. 16 p.

7. *Belozerov I.P.* Experimental determination of porosity and permeability properties of terrigenous reservoirs for creation and validation of a digital core model // Arctic Environmetal Research. 2018. Vol. 18. Iss. 4. P. 141-147. DOI: 10.3897/issn2541-8416.2018.18.4.141

8. Digital Core Laboratory: Properties of reservoir core derived from 3D images / M.A.Knackstedt, C.H.Arns, A.Limaye, A.Sakellariou, T.J.Senden, A.P.Sheppard, R.M.Sok, W.V.Pinczewski, G.F.Bunn // SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management, 29-30 March 2004, Kuala Lumpur, Malaysia. DOI: 10.2118/87009-MS

9. Digital rock physics benchmarks – Part I: Imaging and segmentation / H.Andraa, N.Combaret, J.Dvorkin, E.Glatt, J.Han, M.Kabel, Y.Keehm, F.Krzikalla et. al. // Computers & Geosciences. 2013. Vol. 50. P. 25-32. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.09.005

10. Examination of clastic oil and gas reservoir rock permeability modeling by molecular dynamics simulation using high-performance computing / V.Berezovsky, M.Gubaydullin, A.Yurev, I.Belozerov // Supercomputing: 4th Russian Supercomputing Days, 24-25 September 2018. 2019. Vol. 965. P. 208-217.

11. Lattice-Boltzmann and finite-difference simulations for the permeability for three-dimensional porous media / C.Manwart, U.Aaltosalmi, A.Koponen, R.Hilfer, J.Timonen // Physical Review E. 2002. Vol. 66. DOI: 10.1103/PhysRevE.66.016702

12. *Lemaitre R.* Fractal porous media IV: Three-dimensional stokes flow through random media and regular fractals / R.Lemaitre, P.M.Adler // Transport in Porous Media. 1990.Vol. 5. № 4. P. 325-340.

13. *Pazdniakou A.* Dynamic permeability of porous media by the lattice Boltzmann method / A.Pazdniakou, P.M.Adler // Advances in Water Resources. 2013. Vol. 62. Part B. P. 292-302. DOI: 10.1016/j.advwaters.2013.06001

14. 3D simulation of the permeability tensor in a soil aggregate on the basis of nanotomographic imaging and LBE solver / F.Khan, F.Enzmann, M.Kersten, A.Wiegmann, K.Steiner // Journal of Soils and Sediments. 2012. Vol. 12. Iss. 1. P. 86-96. DOI: 10.1007/s11368-011-0435-3

15. Transport properties of real metallic foams / O.Gerbaux, F.Bujens, V.V.Mourzenko, A.Memponteil, A.Vabre, J.F.Thovert, P.M.Adler // Journal of Colloid and Interface Science. 2010. Vol. 342. Iss. 1. P. 155-165. DOI: 10.1016/j.jcis.2009.10.011

***Авторы*: И.П.Белозеров,** *старший преподаватель, i.belozerov@narfu.ru* (*Северный* (*Арктический*) *федеральный университет имени М.В.Ломоносова*, *Архангельск*, *Россия*), **М.Г.Губайдуллин,** *д-р геол.-минерал. наук, профессор, m.gubaidulin@narfu.ru* (*Северный* (*Арктический*) *федеральный университет имени М.В.Ломоносова*, *Архангельск*, *Россия*).

Статья поступила в редакцию 30.10.2019.
Статья принята к публикации 03.02.2020.