

УДК 550.3:550.4:550.8:552.11
ББК26.0
Ф50

Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Двадцать четвертая международная конференция. Москва, 25 – 27 сентября, Борок, 29 сентября 2023 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2023. – 344 с.

ISBN 978-5-88918-072-2 / ISSN 2686-8938

Представлены материалы докладов, оглашенных на заседаниях тематических секций:

Физико-химические свойства пород и расплавов при высоких давлениях и температурах;
Современные методы экспериментальных исследований;
Петрофизика и ее роль в интерпретации геофизических данных и поиске месторождений полезных ископаемых;
Региональные геолого-геофизические, петрофизические и геоэкологические исследования, исследования в целях освоения Арктики;
Петролого-геофизические подходы построения моделей состава и строения планетарных тел и космохимия;
Петрофизические и геодинамические исследования в интересах экологии.

Материалы докладов опубликованы в авторской редакции.

ISBN 978-5-88918-072-2
ISSN 2686-8938

© ИГЕМ РАН, 2023

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytic Chemistry of RAS

Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy

and Geochemistry of RAS

Petrophysical Commission of Petrographical Committee of RAS

THE TWENTY-FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE PHYSICAL-CHEMICAL AND PETROPHYSICAL RESEARCHES IN THE EARTH'S SCIENCES

Moscow, September 25 – 27, Bорок, September 29, 2023

PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE

Москва
2023

ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИННОЙ ПОРИСТОСТИ НА УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДОЛОМИТОВ ЮРЯХСКОГО И ПЕСЧАНИКОВ ХОРОНОХСКОГО ГОРИЗОНТОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Белкова Е.А., Жуков В.С.

Институт физики Земли (ИФЗ) РАН, г. Москва, Россия, zhukov@ifz.ru

Наличие трещин в горных породах влияет на геофизические поля, в частности, на удельное электрическое сопротивление (УЭС). Разработка месторождений УВ с изменением эффективного давления приводит к изменению пористости, которое вызывает различные геодинамические последствия. Исследование развития трещин может помочь в мониторинге и прогнозировании активизации сейсмических зон (изменение УЭС перед землетрясениями) [Жуков, Кузьмин, Салов, 1991; Смирнов, Пономарев, 2020]. Но даже на лабораторном уровне мало исследованы общие закономерности и особенности влияния трещин на УЭС карбонатов и песчаников.

Цель работы - анализ влияния трещинной компоненты пористости на УЭС доломитов юрхского горизонта и песчаников хоронохского горизонта одного из месторождений УВ Восточной Сибири.

Коэффициент трещинной пористости K_{tr} представляет собой отношение объёма трещин к объёму образца породы Величина трещинной пористости K_{tr} определена по методике [Жуков, Кузьмин, 2020], использующей величины общей (открытой) пористости K_p и скорости продольной волны U_p в исследуемой породе и ее минеральном скелете $U_{p,sk}$ в условиях, моделирующих пластовые, по формуле:

$$K_{tr} = (100 - 1.6 \cdot K_p - 100 \cdot U_p / U_{p,sk}) / 20.4 \quad (1)$$

Параметр пористости (*formation resistivity factor*), относительное сопротивление, рассчитывается по формуле: $R_p = \rho_{v,l} / \rho_v$ (2), где $\rho_{v,l}$ и ρ_v – УЭС водонасыщенной породы и насыщенность её воды соответственно. Так как $\rho_{v,l}$ породы зависит от строения поровых токопроводящих каналов, то зависимость относительного сопротивления от пористости определяется экспериментальной формулой: $R_p = a / K_{tr}^m$ (3), полученной для гранулярных пород [Archie, 1942; Дахнов, 1985] и выражением (4) для трещинных пород [Aguilera, 1976; Tiab, Donaldson, 2004]: $R_p = 1 / K_{tr}^m$ (4), где a – структурный коэффициент, характеризует извилистость токовых каналов, для пород с простейшей геометрией пор ($a=1$) и растёт с усложнением геометрии пор; K_{tr} – коэффициент пористости; m – показатель цементации показывает насколько структура пор

увеличивает УЭС породы, так как предполагается, что сухая порода непроводящая. Увеличение проницаемости уменьшает показатель цементации. В уравнении Арчи-Дахнова (3) m изменяется вблизи величины 2 (0.6-3.0), а в уравнении Агилера и Тиба (4) он равен 1 для взаимно-связанных и проницаемых трещин. В результате уплотнения и закрытия части пор их извилистость увеличивается.

Исследования влияния на R_p и УЭС проводили Э.И. Пархоменко [Пархоменко, 1965], Агуилера, [1976], В.С. Жуков [Жуков, 2022] и др. Наличие трещин, заполненных электропроводящим раствором, существенно снижает УЭС по сравнению с УЭС, обусловленным межзерновой пористостью такого же объёма. УЭС трещинной породы зависит от количества раскрытости и ориентации трещин.

Объектом исследования были образцы горных пород из скважин месторождения в Восточной Сибири – доломиты из юрхского продуктивного пласта с глубин 1657-1697 метров и песчаники из хоронохского продуктивного пласта с глубин 2507-2537 метров. Использовались общепринятые методики определения петрофизических параметров. По результатам исследований образцов доломита и песчаника с различной трещинной пористостью в пластовых условиях были получены зависимости R_p от пористости.

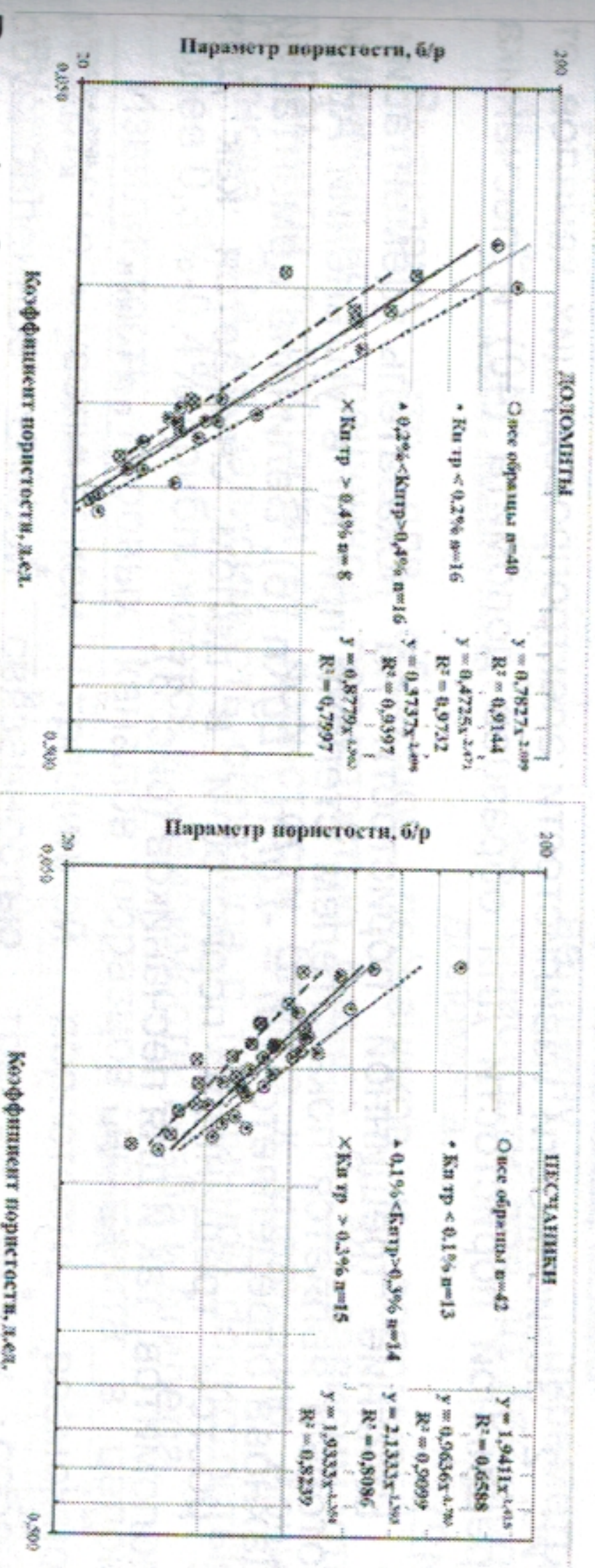


Рис. 1. Зависимости параметра пористости, рассчитанного по уравнению Арчи-Дахнова для 40 образцов доломита и 42 образцов песчаника от коэффициента пористости.

Влияние трещинной пористости на R_p . На рисунке 1 показано, что в целом с ростом трещинной пористости как у доломитов, так и у песчаников соответственно, уменьшается наклон графика степенной зависимости параметра пористости от коэффициента пористости. Все образцы доломита разбиты по величине K_{tr} на три группы: менее 0.2% (16 образ.), от 0.2% до 0.4% (16 образ.), более 0.4% (10 образ.). Все образцы песчаника разбиты по величине K_{tr} на три группы: менее 0.1% (13 образ.), от 0.1% до 0.3% (14 образ.), более 0.3%

(15 обр.). Наклон аппроксимирующих степенных зависимостей R_p от K_p снижается с ростом $K_{тр}$ и m , т.е. при усложнении геометрии пустот.

Электрическая извилистость пор, рассчитана по (5): $a = (K_p \cdot R_p)^{0.5}$ (5). Для образцов доломита и песчаника с минимальной трещинной пористостью извилистость растет с увеличением трещинной пористости (рис.2). Заем у образцов доломита с трещинной пористостью от 0.2%, а для песчаников с трещинной пористостью от 0.2%, а для песчаников от 0.1% извилистость снижается с ростом трещинной пористости. В целом с ростом трещинной пористости для доломитов отмечен рост извилистости пор, а у песчаников — снижение.

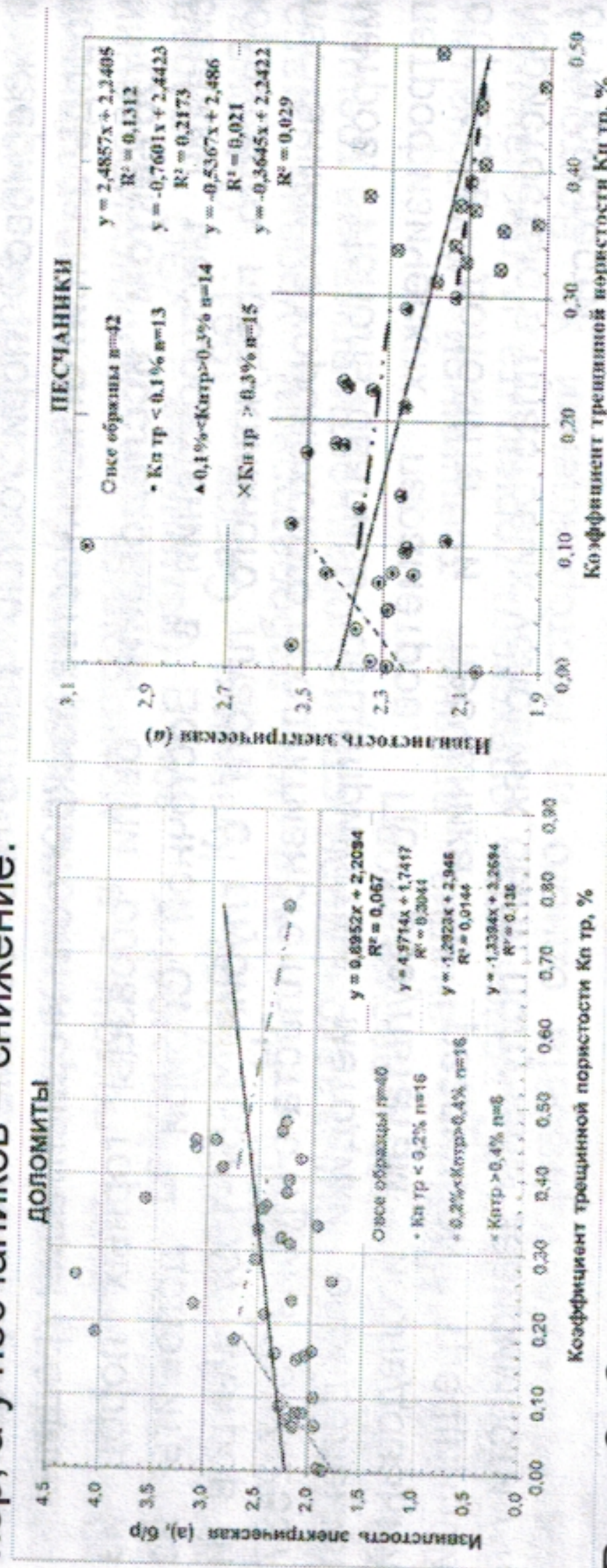


Рис. 2. Зависимости извилистости электропроводящих каналов от трещинной пористости для образцов доломита (40) и песчаника (42).

Влияние трещинной пористости на показатель цементации, который является показателем степени при K_p в уравнении Арчи-Дахнова определяется: $m = -LgR_p / LgK_p$ (6). Величина цементации с ростом трещинной пористости в целом снижается как для доломитов, так и для песчаников (рис. 3).

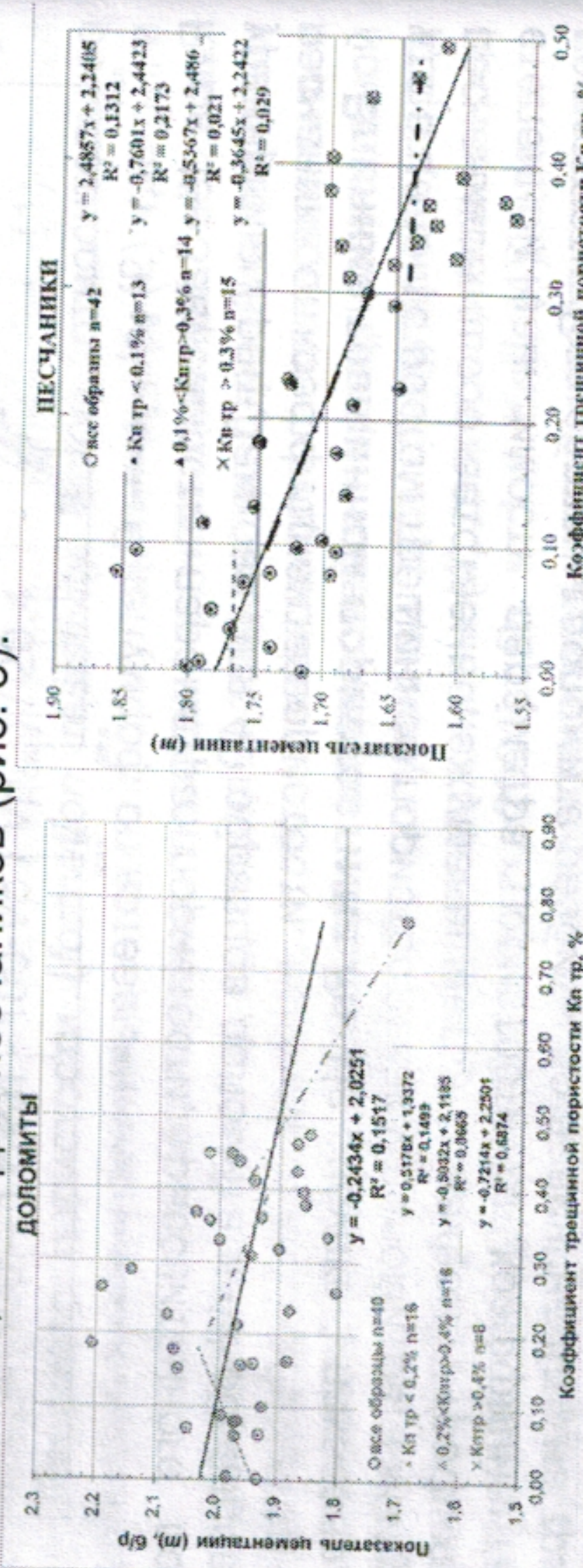


Рис. 3 — Зависимости показателя цементации от трещинной пористости для 40 образцов доломита и 42 образцов песчаника.

Показатель цементации доломитов при минимальной трещинной пористости (<0.2%) растет, но далее, с ростом трещин, уменьшается. Для песчаника наблюдается более явное уменьшение показателя цементации: у образцов с минимальной трещинной пористостью величина $m \sim 1.8$, что характерно для хорошо сцементированных пород в основном с межзерновой пористостью; при максимальной трещинной пористости (>0.3%) песчаников m снижается до ~ 1.5 , что более характерно для слабоцементированных песчаников. Но достоверности зависимости низкие ($R^2 < 0.2$).

Влияние доли трещинной пористости на R_p в случае доломитов (рис.4) имеет степенной вид и достоверно ($R^2=0.82$). Доля трещинной пористости образцов коллекции песчаников практически не влияет на значение R_p и не проявляется на зависимости ($R^2=0.22$).

Рис. 4 — Влияние доли трещинной пористости на величину параметра пористости для 40 образцов доломита.

Выявлено, что для образцов песчаников и доломитов с минимальной трещинной пористостью (менее 0,1%) зависимость параметра пористости от пористости близка к уравнению Арчи-Дахнова. Эта же зависимость образцов с трещинной пористостью более 0,3%-0,4% приближается к зависимости Тиба и Агилера.

Извилистость поровых каналов образцов доломита в целом растет с увеличением трещинной пористости, возможно, обусловленное слабой связанностью трещин между собой. Извилистость пор песчаников уменьшается с ростом трещинной пористости, из-за увеличения связи между межзерновыми порами и трещинами. Показатель цементации образцов доломитов и песчаников с ростом трещинной пористости снижается, что может обусловить увеличение проницаемости. Показано, что наличие трещинной пористости существенно влияет на электрические параметры исследованных образцов коллекторов, а выявленные зависимости могут быть полезны при разработке месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Салов Б.Г. Деформации и трещинообразование в образцах горных пород при длительном

- воздействии постоянных сжимающих напряжений // Модельные и натурные исследования очагов землетрясений: Сборник / ИФЗ АН СССР. М.: Изд-во "Наука", 1991. - С.156-163.
2. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН, 2020. 412с.
 3. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // Физика Земли. 2020. № 4. – С. 39-50. – DOI 10.31857/S0002333720040109.
 4. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. – 2-е издание, переработанное и дополненное. - М.: Недра. 1985. - 310с.
 5. Archie G.E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Трэн, АIME (1942) 146, Р.54-67.
 6. Aguilera R. Analysis of Naturally Fractured Reservoirs from Conventional Well Log // JPT. V.28, №7. Р.764-772.
 7. Tiab D., Donaldson E.C. Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties, 2-nd ed., Oxford: Gulf, 2004. - 866 p.
 8. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. - 164 с.
 9. Жуков В.С. Влияние межзерновой и трещинной пористости на электросопротивление коллекторов Чаяндинского месторождения (Восточная Сибирь) // Геофизические исследования. 2022. Т. 23. № 2. – С. 5-17. – DOI 10.21455/gr2022.2-1.

INFLUENCE OF FRACTURE POROSITY ON ELECTRICAL RESISTIVITY OF DOLOMITES OF YURYAKHNSKY AND KHORONOKHNSKY SANDSTONES OF EASTERN SIBERIAN HORIZONS

Belkova E.A., Zhukov V.S.

Institute of Physics of the Earth (IPE) RAS, Moscow, Russia, zhukov@ifz.ru

The results of experimental studies have shown that for sandstone and dolomite samples with minimal fractured porosity (less than 0.1%) the dependence is similar to the Archie-Dakhnov equation for intergranular reservoirs. For samples with fractured porosity more than 0.3%-0.4%, this dependence is more similar to the Tiab and Aguilera dependence for fractured rocks. Sandstone pore tortuosity decreases with increasing fracture porosity, which increases the connections between intergranular pores and fractures. The cementation index of dolomite and sandstone samples decreases with increasing fractured porosity, which may cause a decrease in their strength and an increase in permeability. The value of fracture porosity influences significantly the electrical parameters of the studied samples.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ Внутренней структуры и механических свойств образцов горных пород при циклическом нагружении

Белобородов Д.Е.,^{1,2} Дубиня Н.В.,¹ Краснова М.А.

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ) РАН, Москва, beloborodov@ifz.ru, mkrasnova@ifz.ru

²Московский физико-технический институт (МФТИ), Долгопрудный, dubinya.lv@gmail.com

В докладе представлен обзор результатов лабораторных исследований изменения внутренней структуры образцов горных пород и соответствующих изменений эффективных динамических упругих модулей, в условиях обстановки псевдотрехосного сжатия. Рассматривается каким образом накопление в образцах горных пород необратимых деформаций сказывается на их эффективных свойствах.

В горных породах локализация пластической деформации может быть связана с активизацией существующих микротрещин и появлением новых систем трещин, а также с потерей сплошности на участках плоскостях напластования. В свою очередь, изменение внутренней структуры горных пород меняет их деформационные, прочностные, реологические и фильтрационные свойства.

Математическое описание таких процессов и создание соответствующих моделей, устанавливающих связь между текущим напряженно-деформированным состоянием массива горных пород, деформаций, историей изменения напряжений и наблюдаемыми свойствами сопряжено со значительными сложностями. В первую очередь, эти сложности обусловлены значительным количеством входящих в разрабатываемые модели параметров, не поддающихся фактическому экспериментальному определению стандартными методами. Разрабатываемые модели характеризуются значительной неоднозначностью, тогда как стандартные методы исследования механических свойств позволяют изучать их только в ограниченном масштабе.

К основным целям цикла работ, к которому относится выносимый доклад, можно отнести создание математической модели, способной достоверно определять историю изменения напряженно-деформированного состояния горной породы по ее текущим