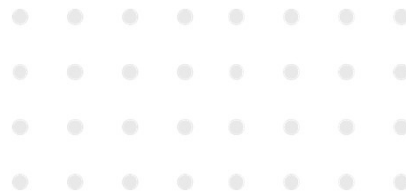

Построение модели насыщения Брукс-Кори и ее равновесная инициализация в ГДМ

Докладчики:

Ведущий инженер ПАО Татнефть
Файзрахманов Галим

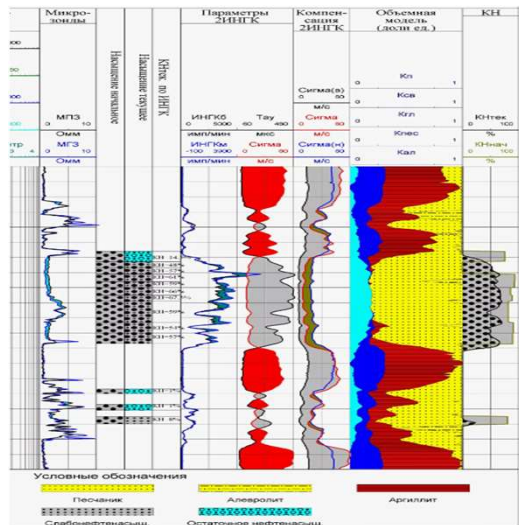
Инженер 1 категории ПАО Татнефть
Еремеев Данил

Ведущий инженер ПАО Татнефть
Мавлявов Ильнур



Типы моделей насыщения в геологии терригенных коллекторов

Электрометрическая модель



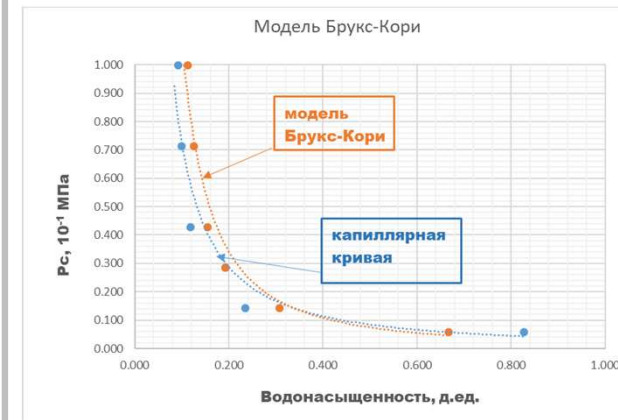
Пример (уравнение Арчи-Дахнова):

$$K_v = \left(\frac{d \cdot \rho_v}{K_{\Pi}^m \cdot \rho_n} \right)^{\frac{1}{n}}$$

- Учет в каждой скважине в отдельности;
- Общепринятый метод построения;
- Не требует спец. исследований керна.

- Не учитывает капиллярные эффекты;
- Влияние разработки;
- Невозможность равновесной инициализации в ГДМ.

Капиллярно-гравитационная модель



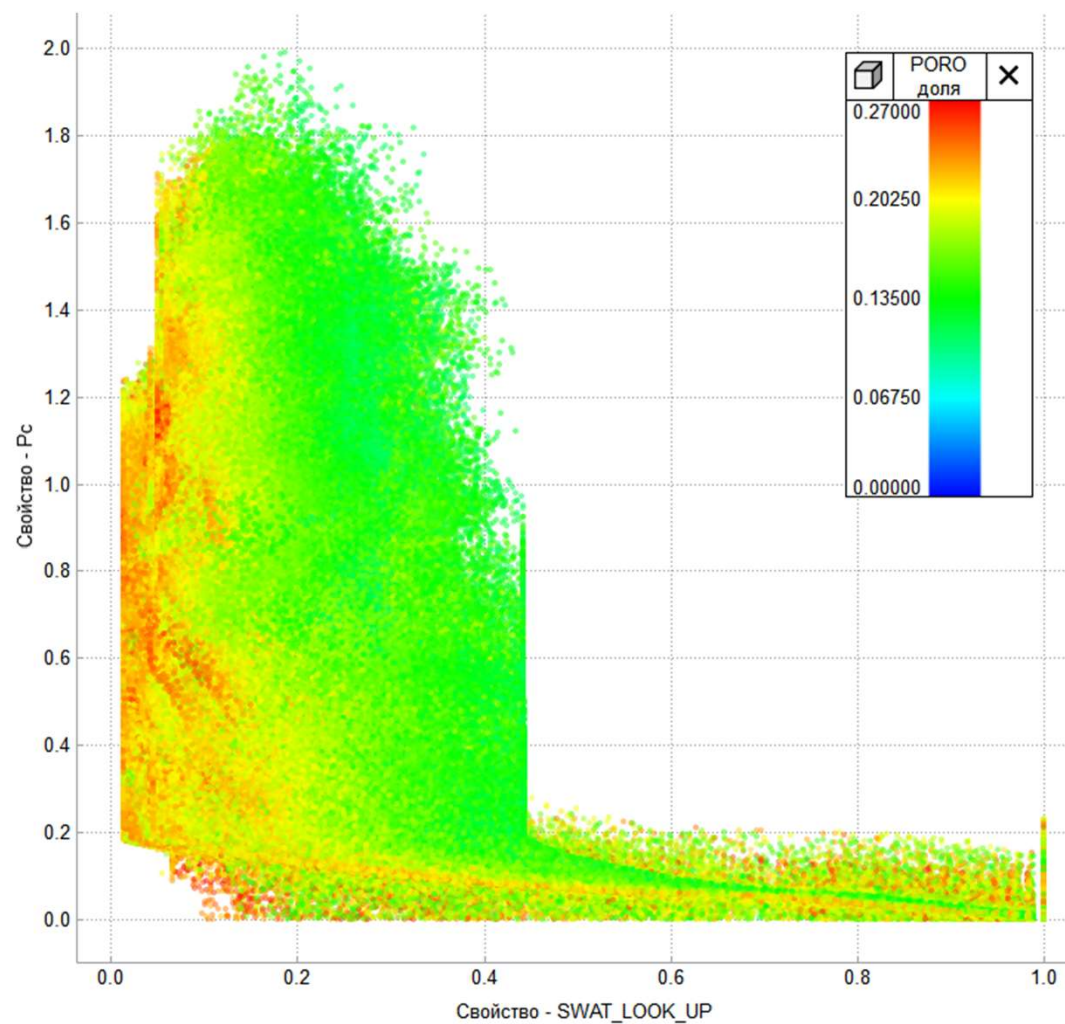
Пример (уравнение Брукса-Кори):

$$K_v = K_{vo} + (1 - K_{vo}) \cdot \left(\frac{P_{выт}}{P_c} \right)^{\frac{1}{n}}$$

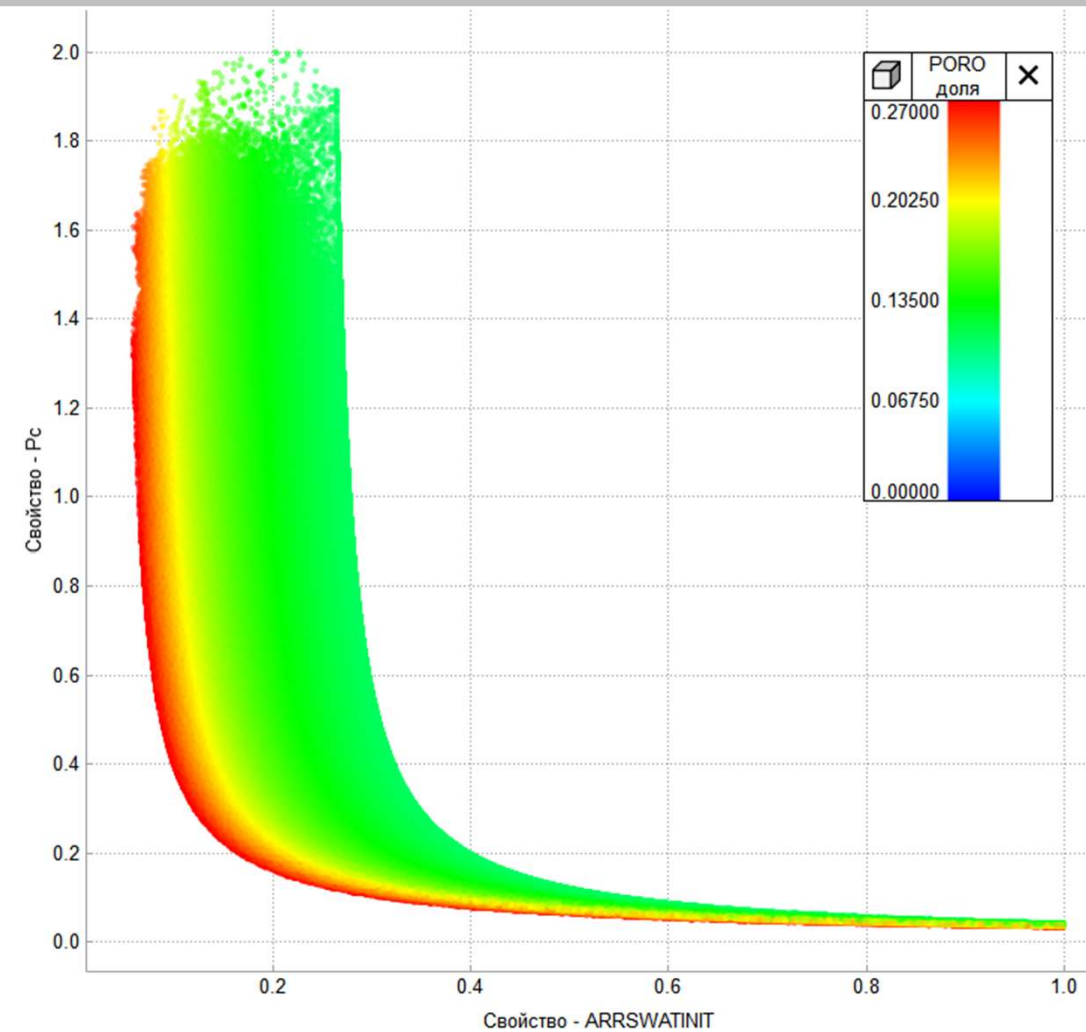
- Менее чувствителен к качеству каротажа;
- Отсутствие влияния разработки;
- Более физичная;
- Возможность равновесной инициализации
- Необходимость качественных спец. исследований;
- Более осредненный показатель насыщенности;

Сравнение моделей насыщения

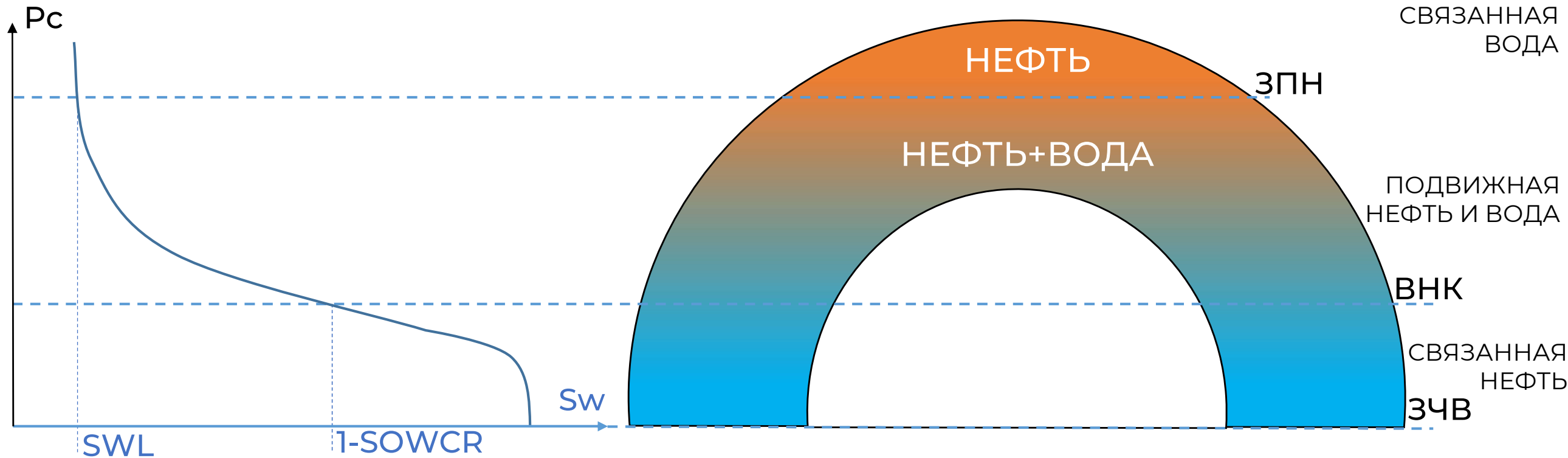
Электрометрическая модель



Капиллярно-гравитационная модель



ОБЩИЙ ВИД МОДЕЛИ НАСЫЩЕНИЯ В ГМ



$$K_B = K_{BO} + (1 - K_{BO}) * K_{BN}$$

$$K_{BN} = a \cdot f(H_{fwl})$$

$$K_{BN} = \left(\frac{J}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$$

$$K_{BN} = \left(\frac{P_{ВЫТ}}{P_c}\right)^{\frac{1}{n}}$$

Произвольная
зависимость

J функция

Брукс-Кори

Принятые обозначения

SWL

$SOWCR$

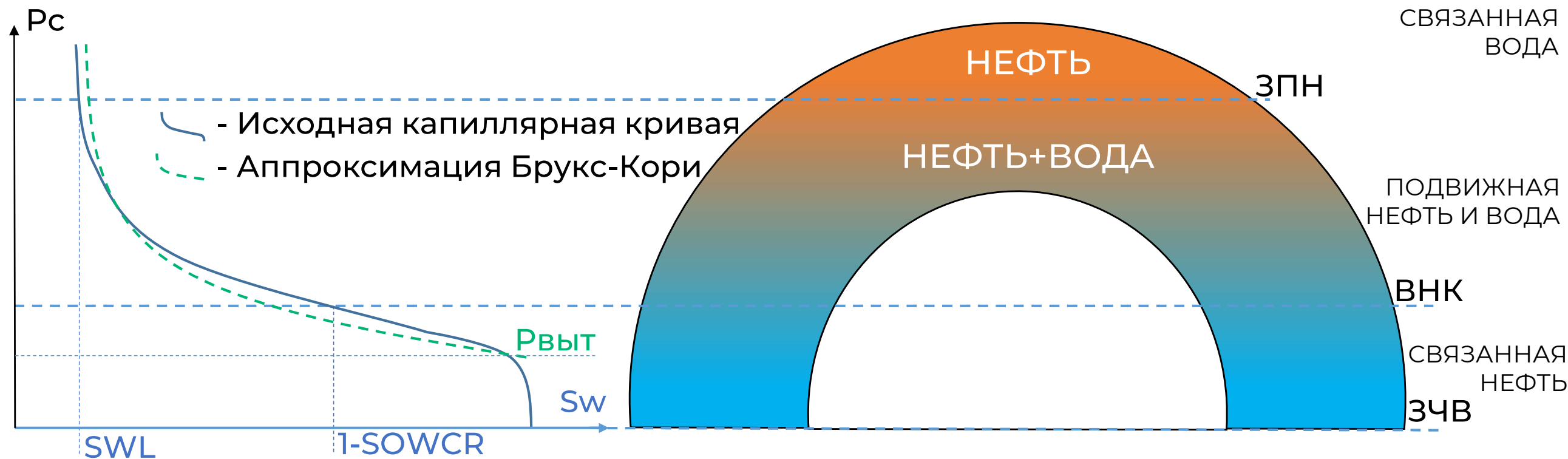
SWn

Связная вода

Остаточная нефть

Нормированная
водонасыщенность

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ БРУКС-КОРИ



Описываемая зависимость

$$K_B = K_{BO} + (1 - K_{BO}) * \left(\frac{P_{\text{выт}}}{P_c}\right)^{\frac{1}{n}}$$

Особенности

$$\left(\frac{P_{\text{выт}}}{P_c}\right)^{\frac{1}{n}} \rightarrow 0 \quad \rightarrow \quad K_B \rightarrow K_{BO}$$

$$\left(\frac{P_{\text{выт}}}{P_c}\right)^{\frac{1}{n}} \neq 0 \quad \rightarrow \quad K_B \neq K_{BO}$$

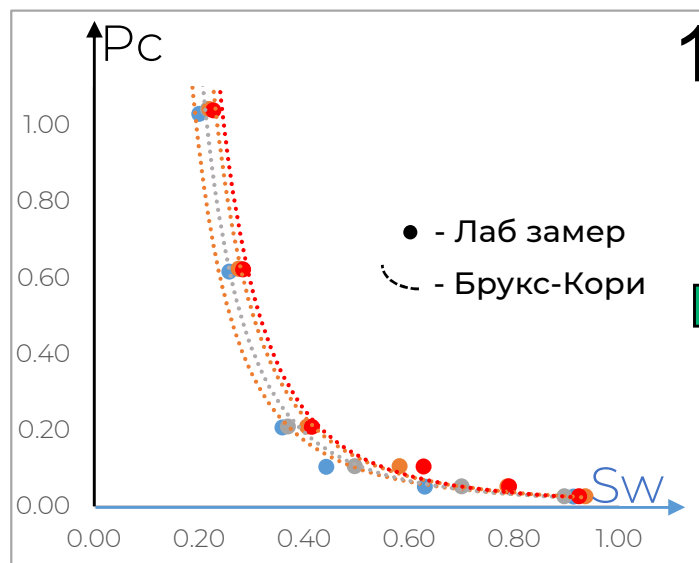
WORKFLOW ПОСТРОЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ

1
Обработка керновых исследований капиллярных давлений по каждому образцу.

2
Сбор параметров K_p , K_{pr} , K_{vo} , $R_{выт}$ и n с каждого образца в сводную таблицу.

3
Поиск корреляций между параметрами $K_{vo}(K_p)$, $K_{pr}(K_{vo})$, $R_{выт}(K_{pr}/K_p)$, $n(K_{pr}/K_p)$

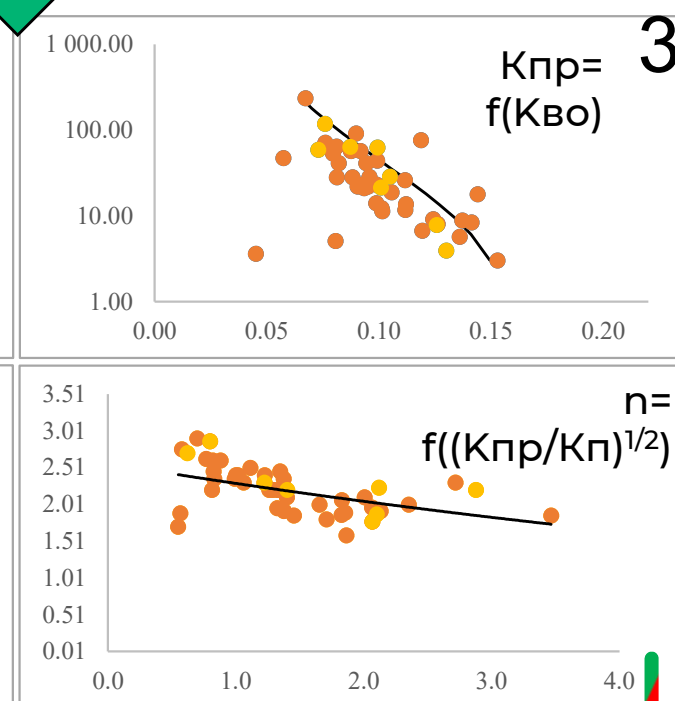
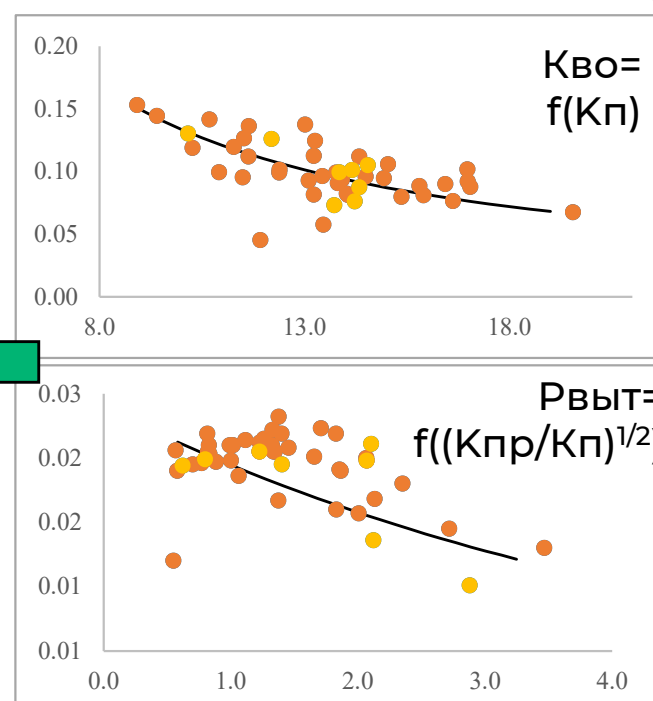
4
Расчет кубов фильтрационно-емкостных свойств и водонасыщенности.



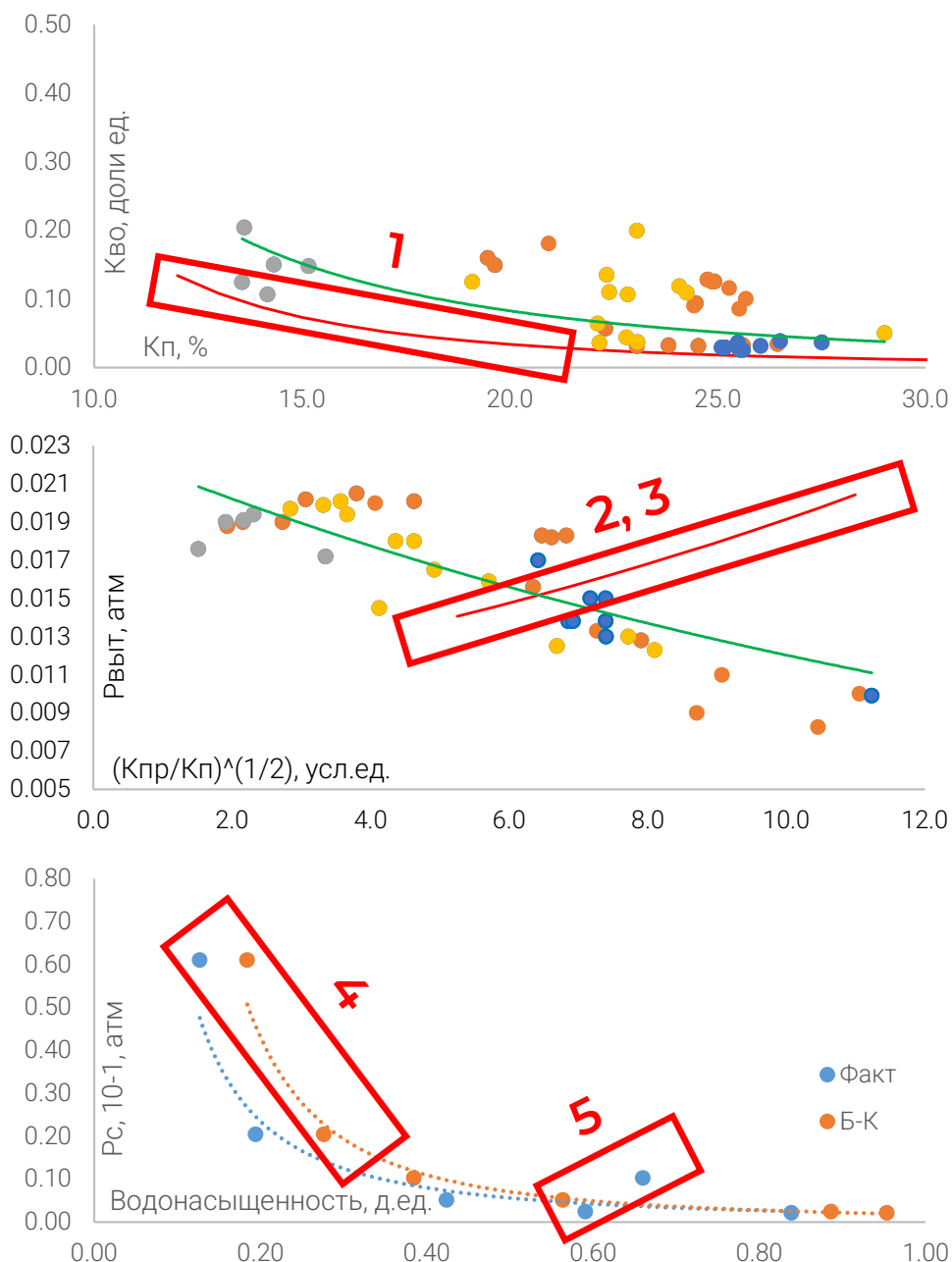
2

№ обр.	K_p , %	K_{pr} , мД	K_{vo} , д.ед.	$R_{выт}$, Па*10 ⁵	n	K_{pr}/K_p
54	10.7	8.3	0.142	0.020	2.60	0.88
57	14	41.1	0.082	0.022	1.80	1.71
59	11.5	21.9	0.095	0.023	1.91	1.38
66	13.5	46.9	0.058	0.019	1.58	1.87
16	17.1	57.0	0.088	0.022	1.86	1.83
24	17	57.0	0.092	0.016	2.06	1.83
25	14.1	64.0	0.081	0.017	1.91	2.13
26	8.92	3.0	0.153	0.019	2.75	0.58

- 4
- ☒ SWL
 - ☒ PERMX
 - ☒ $\sqrt{K_{pr}/K_p}$
 - ☒ Pvit
 - ☒ H_FWL
 - ☒ P_c
 - ☒ SW_BC
 - ☒ SOIL_BC



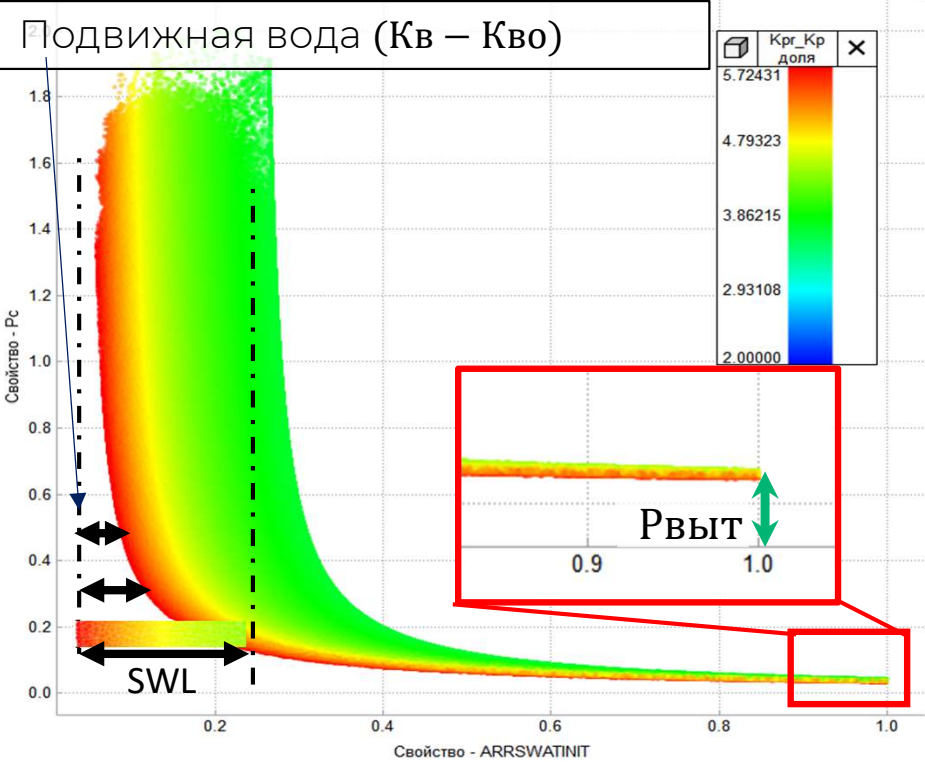
ТИПИЧНЫЕ ОШИБКИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ БК



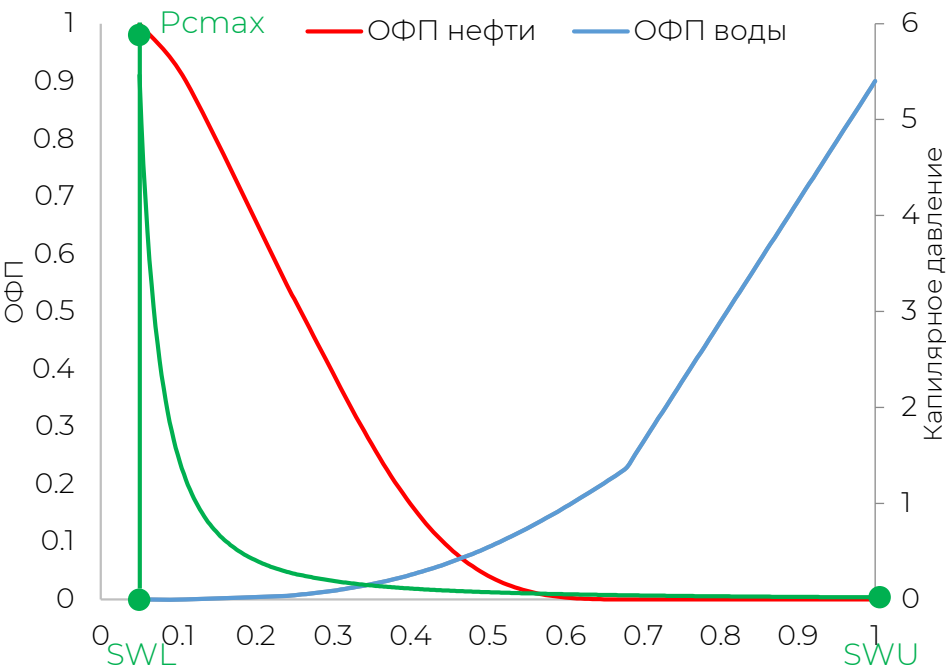
1. Показатели трендов выходят за пределы измеренных значений (исследовать в пределах диапазона показаний ГМ и лаб. исследований);
2. Нефизичный характер кривых (напр. Рвыт растет с ростом Кп) В идеальном случае все функции монотонно убывают;
3. Диапазон значений в модели не совпадает с лабораторными исследованиями;
4. Показатели полученной водонасыщенности не совпадают с лабораторными исследованиями
5. Использование некондиционных замеров (нефизичное падение тренда, перегибы, вылеты использование недожатых измерений)

Сравнение моделей насыщения

Геологическая модель



Гидродинамическая модель



$$\left(\frac{P_{ВЫТ}}{P_c}\right)^{\frac{1}{n}} \rightarrow 0$$

$K_B \rightarrow K_{BO}$, но $K_B \neq K_{BO}$

$$\left(\frac{P_{ВЫТ}}{P_c}\right)^{\frac{1}{n}} \neq 0$$

$K_B \neq K_{BO}$, $P_c \neq 0$ т.к. $P_c(SWU) = P_{ВЫТ}$

$K_B = K_{BO}$ при $P_c(\Delta \rho g h) \geq P_{cmax}$

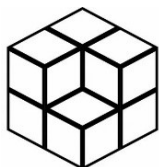
$P_c = 0$ при $SW = SWU$

РАВНОВЕСНАЯ VS НЕРАВНОВЕСНАЯ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ

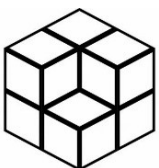
РАВНОВЕСНАЯ (SWOF, JFUNC, PCW)

1. Расчет начального состояния исходя из условия капиллярно-гравитационного равновесия;
2. Позволяет получить равновесное начальное состояние (более «физичное» состояние с учетом ККД и ФЕС);
3. Увеличивается скорость расчета.
4. «Прямое» влияние изменений в ГДМ на начальное насыщение (при изменении ФЕС меняется характер насыщения).

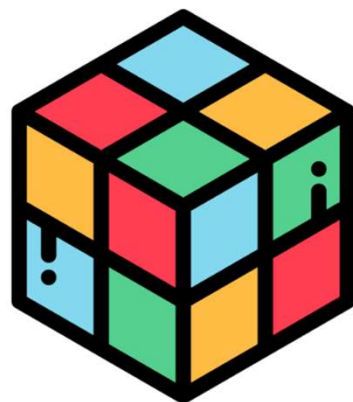
PORO \rightarrow PCW_{MAX}
 PERM \rightarrow SWL



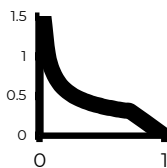
DEPTH \rightarrow P_c



SWAT



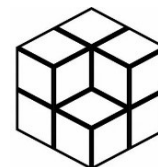
SWOF (P_c(Sw))



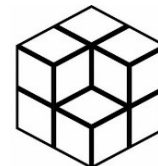
НЕРАВНОВЕСНАЯ (SWATINIT)

1. Явное задание начального состояния из ГМ (меньше трудозатрат на начальном этапе);
2. Максимально приближенное значение начальных геологических запасов;
3. Начальное состояние в общем случае неравновесно;

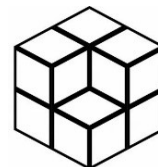
PERM \rightarrow SWL



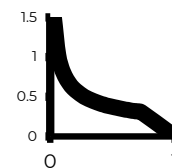
DEPTH \rightarrow P_c



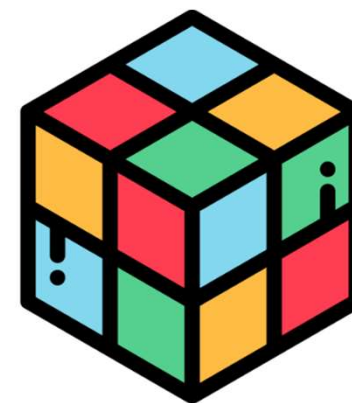
SWATINIT



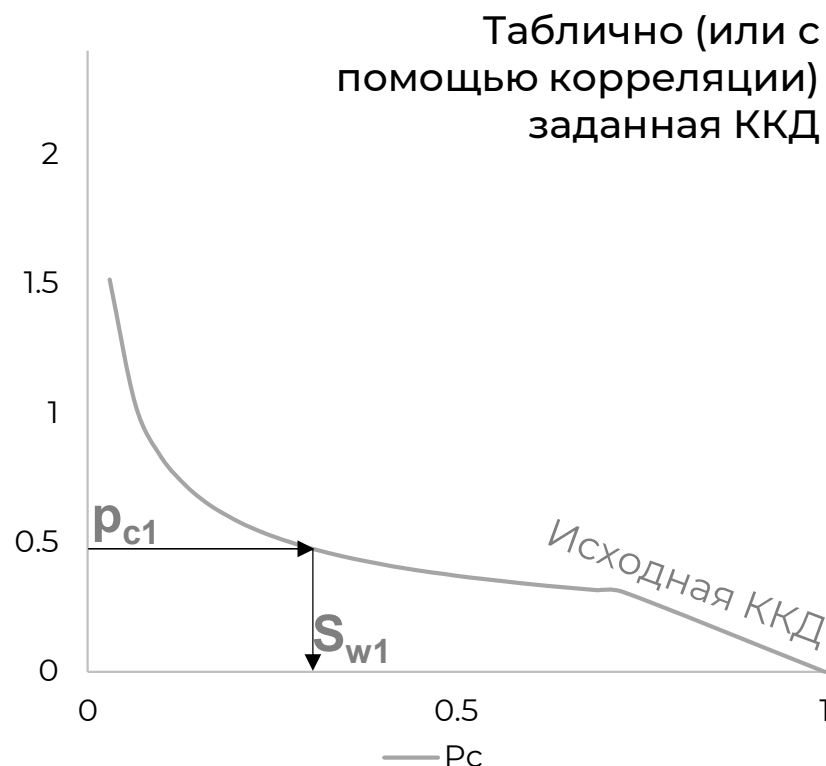
SWOF (P_c(Sw))



PCW_{MAX}

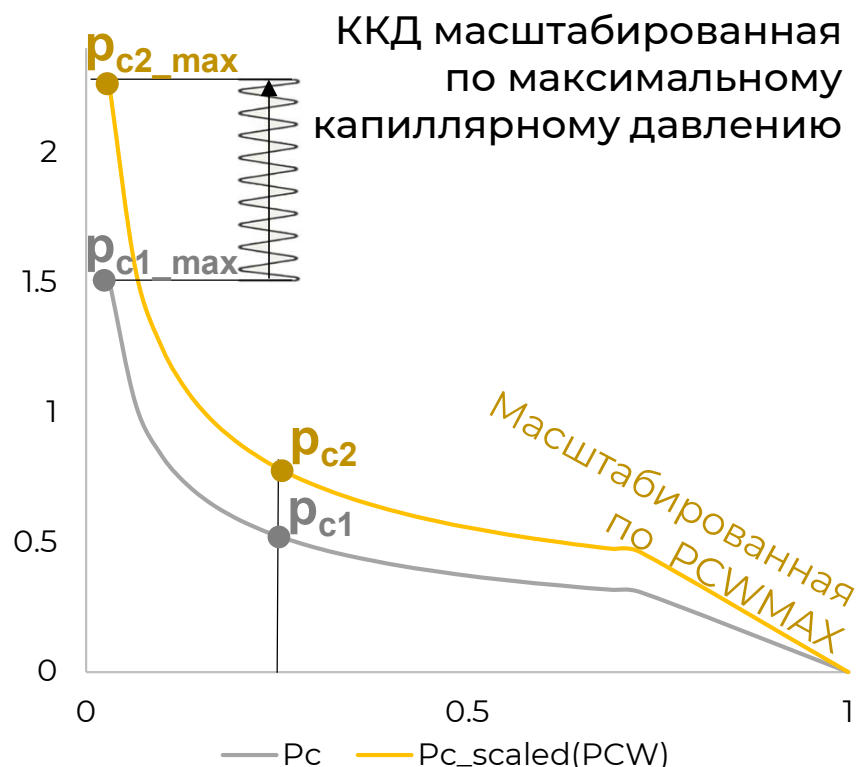


ПРИНЦИП РАСЧЕТА НАСЫЩЕННОСТИ И МАСШТАБИРОВАНИЯ



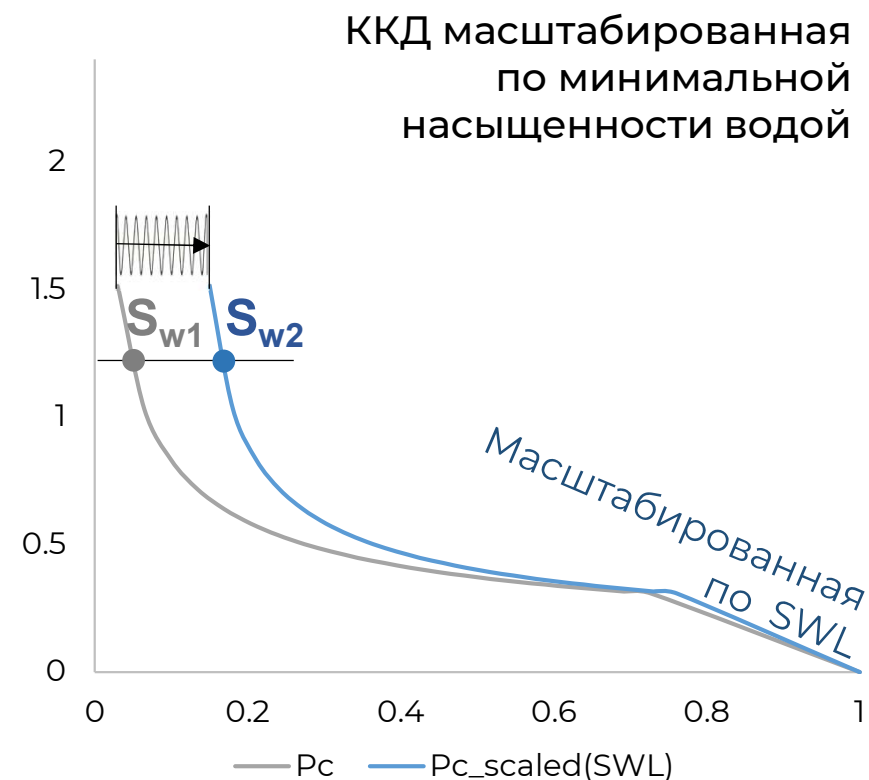
$$p_c = \Delta \rho \times g \times h$$

$$S_w = f(p_c)$$



$$p_{c2} = p_{c1} \times P_{cw_mult}$$

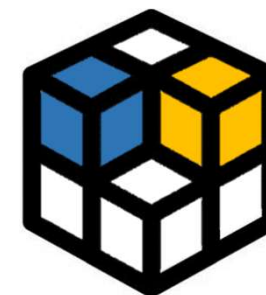
$$P_{cw_mult} = p_{c2_max} / p_{c1_max}$$



$$S_{w2} = S_{w1} + (1 - S_{w1}) \times S_{wn}$$

$$S_{wn} = (1 - S_{w1}) / (1 - S_{w1})$$

Масштабирование рассчитывается отдельно по каждой ячейке по обеим осям.
Т.е. на выходе мы получаем индивидуальные кривые капиллярного давления для каждой ячейки.



НЕРАВНОВЕСНАЯ ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ. МЕХАНИКА РАБОТЫ

1. EQUIL

Для каждого региона равновесия задается FWL

2. $SWL = f(\Phi EC)$

Для каждой ячейки на основе её ФЕС рассчитывается значение минимальной водонасыщенности в ячейке – масштабирование водонасыщенности

3. $p_{c_depth} = \Delta \rho g \Delta h$

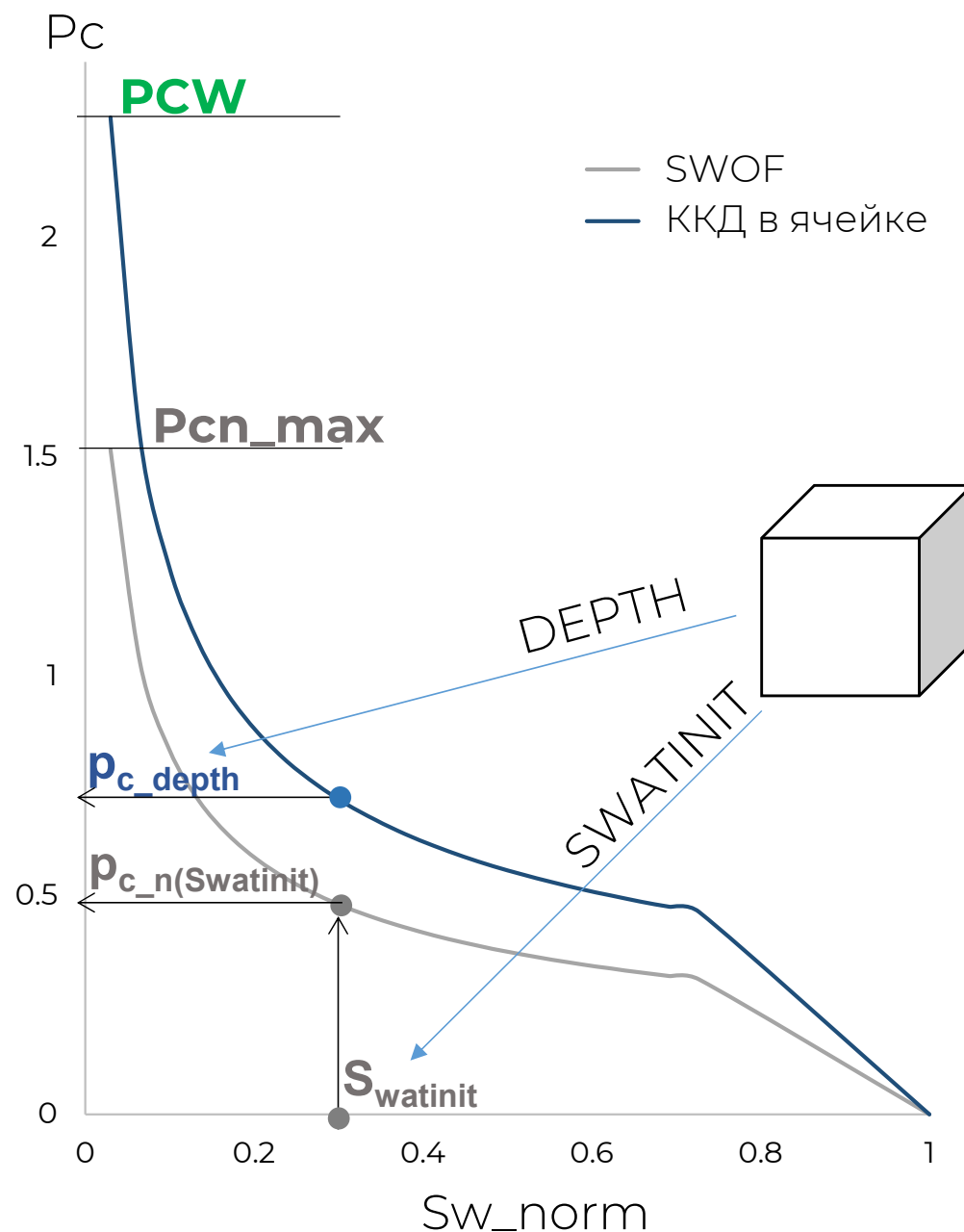
ГДМ рассчитывает капиллярное давление из плотности флюидов и высоты над FWL

4. $PCW = P_{cn_max} \times (P_{c_depth} / P_{c_n}(SWATINIT))$

На основе её ФЕС рассчитывается значение максимального капиллярного давления в каждой ячейке – масштабирование капиллярного давления по текущему состоянию SWATINIT (поправка подбивается под насыщение).

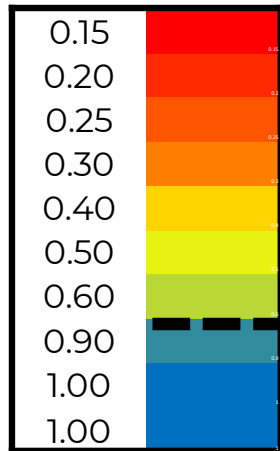
5. $S_w = SWOF(P_c(PCW))$

Для каждой ячейки на основе таблицы SWOF (или корреляции) масштабированной по п.2 и п.3 получаем значение водонасыщенности (вкладка МОП в tНавигатор)



НЕРАВНОВЕСНАЯ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ

Палитра
водонас-ти



ВНК в той же ячейке

P_{cwmax}

0.6000
0.6038
0.6000
0.6000
0.6000
0.6007
0.6000
0.6000
0.6000
0.6000
0.6000



ВНК на 1 ячейку ниже

P_{cwmax}

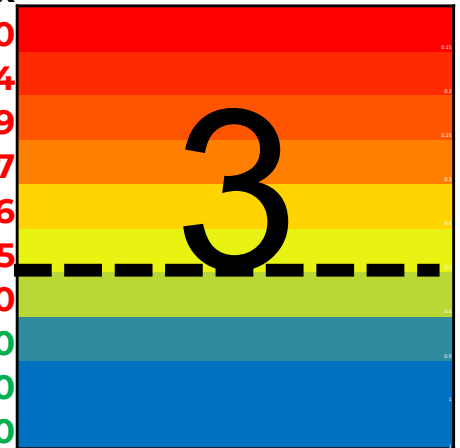
0.6000
0.6967
0.7091
0.7333
0.7714
0.8410
1.0000
1.7999
0.6000
0.6000
0.6000



ВНК на 1 ячейку выше

P_{cwmax}

0.5810
0.5244
0.4909
0.4667
0.4286
0.3605
0.2000
0.6000
0.6000
0.6000



Максимальное капиллярное давление в системе рассчитанное по SWATINIT*

*ФЕС и SWOF в каждом случае идентичны

РАВНОВЕСНАЯ ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ. МЕХАНИКА РАБОТЫ JFUNC

1. EQUIL

Для каждого региона равновесия задается FWL

2. $SWL = f(\Phi EC)$

Для каждой ячейки на основе её ФЕС рассчитывается значение минимальной водонасыщенности в ячейке – масштабирование водонасыщенности

3. $p_{c_depth} = \Delta \rho g \Delta h$

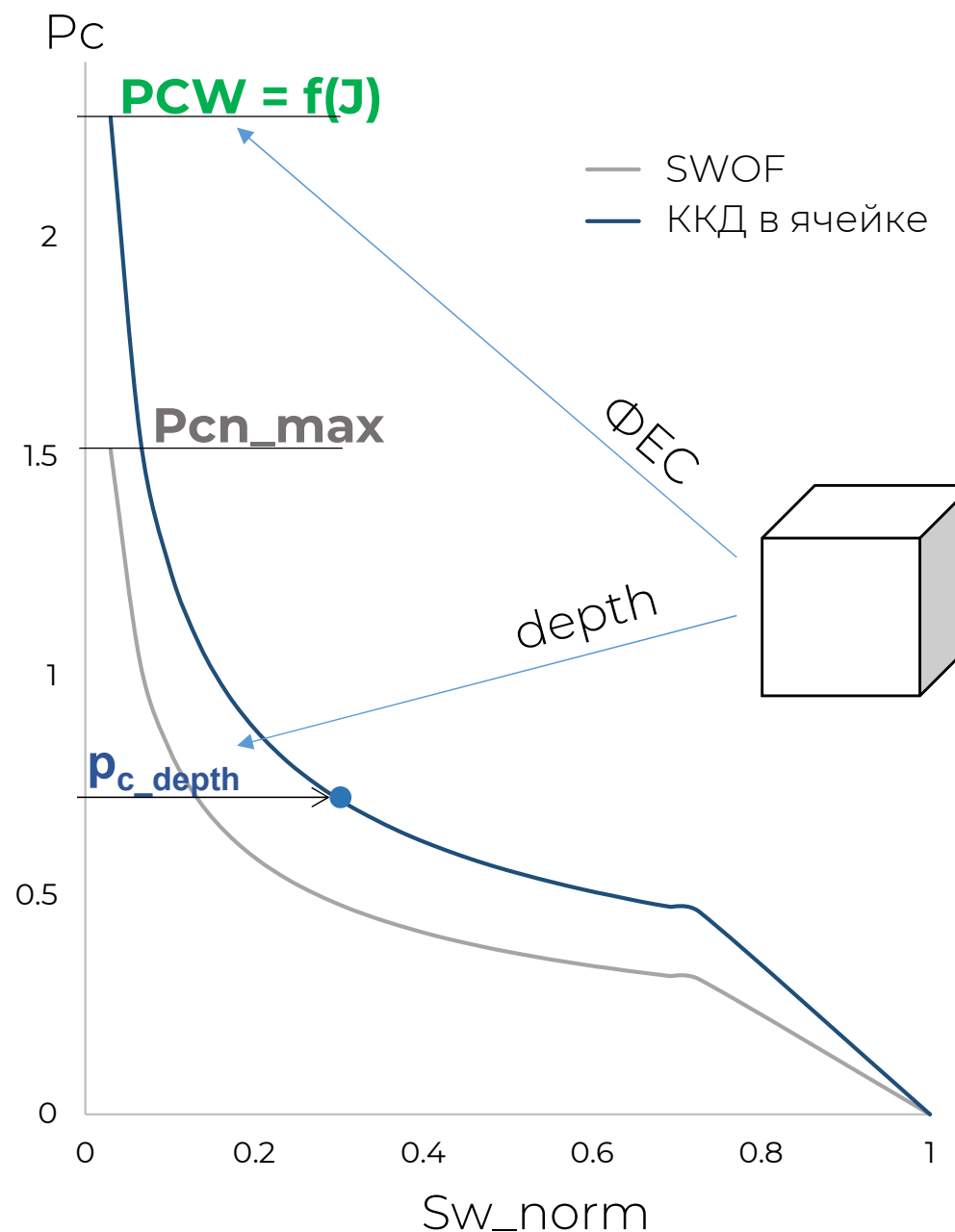
ГДМ рассчитывает капиллярное давление из плотности флюидов и высоты над FWL

4. $PCW = f(J \text{ функции})$

Для каждой ячейки на основе её ФЕС рассчитывается значение максимального капиллярного давления в ячейке – для дальнейшего масштабирования по нему.

5. $S_w = SWOF(P_c(PCW))$

Для каждой ячейки на основе таблицы SWOF (или корреляции) масштабированной по п.2 и п.3 получаем значение водонасыщенности (вкладка МОП в tНавигатор)



РАВНОВЕСНАЯ ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ. ЗАДАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО PCW

1. EQUIL

Для каждого региона равновесия задается FWL

2. $SWL = f(\Phi EC)$

Для каждой ячейки на основе её ФЕС рассчитывается значение минимальной водонасыщенности в ячейке – масштабирование водонасыщенности

3. $p_{c_depth} = \Delta \rho g \Delta h$

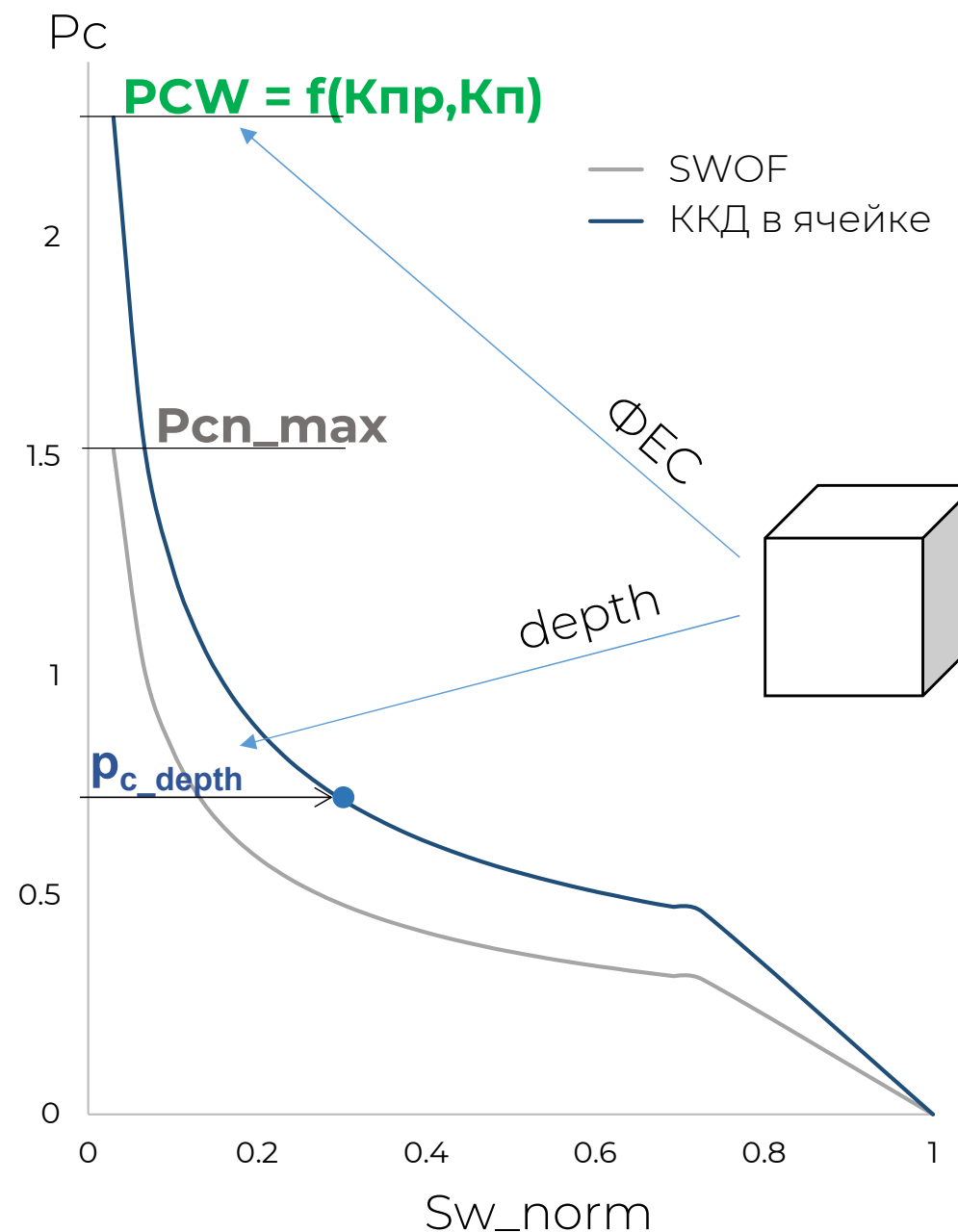
ГДМ рассчитывает капиллярное давление из плотности флюидов и высоты над FWL

4. $PCW = f(J \text{ функции})$

Для каждой ячейки на основе её ФЕС рассчитывается значение максимального капиллярного давления в ячейке – для дальнейшего масштабирования по нему.

5. $S_w = SWOF(p_c(PCW))$

Для каждой ячейки на основе таблицы SWOF (или корреляции) масштабированной по п.2 и п.3 получаем значение водонасыщенности (вкладка МОП в tНавигатор)



УСЛОВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО НАСЫЩЕНИЯ БРУКСА-КОРИ В ГДМ

СТРОИМ КРОССПЛОТ
ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ
ИЗ ГМ ОТ
КАПИЛЛЯРНОГО
ДАВЛЕНИЯ

1

РЕМАСШТАБИРУЕМ
ВОДОНАСЫЩЕННОСТЬ
ПО МИНИМАЛЬНОЙ
ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ

2

ПОИСК КОРРЕЛЯЦИИ
С ФЕС (В ДАННОМ
СЛУЧАЕ С ПАМЕТРОМ
 $\sqrt{(K_{pr}/K_p)}$

3

Расчет нормированной
ККД по минимальной
водонасыщенности и
максимальному
капиллярному давлению

4

$+P_c$
 $+S_w$

$P_c(S_w)$

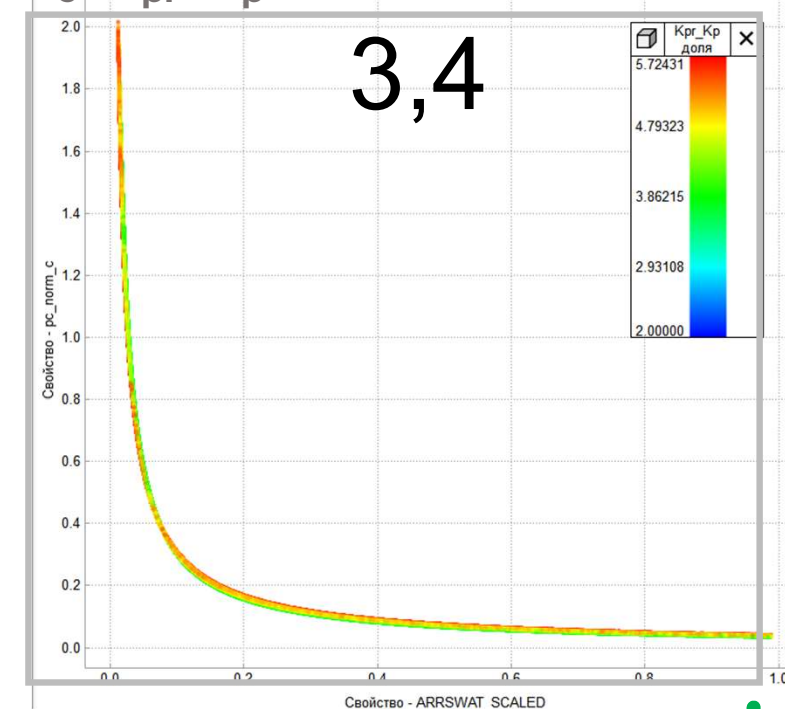
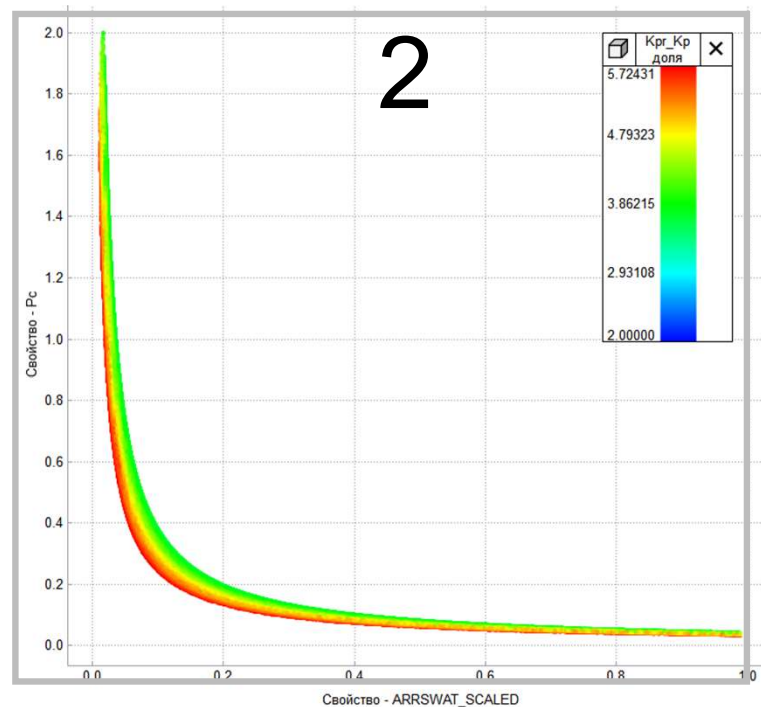
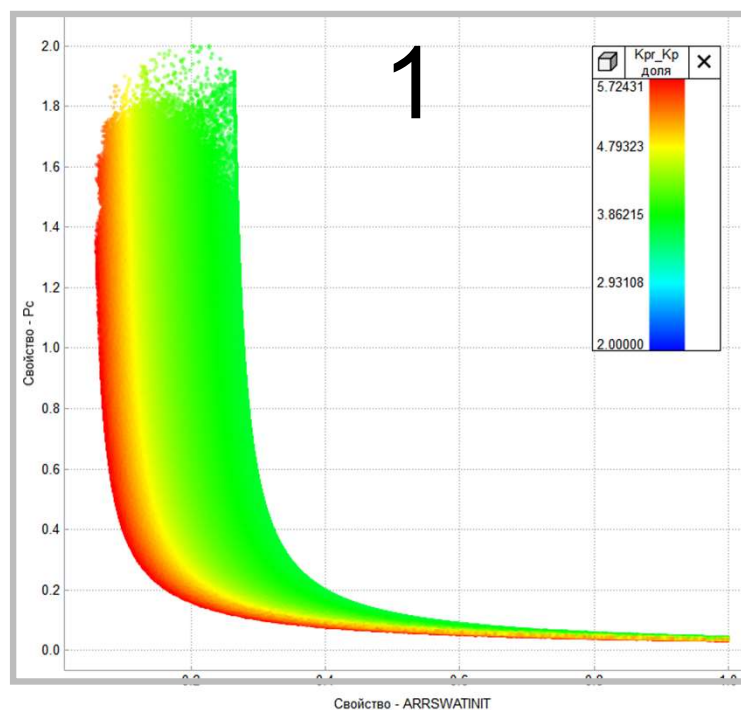
$+SWL$

$P_c(S_{wn})$

$+K_{pr}-K_p$

$P_c(S_{wn})$
 $P_c(K_{pr}-K_p)$

SWOF
PCW



УСЛОВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО НАСЫЩЕНИЯ БРУКСА-КОРИ В ГДМ

СТРОИМ КРОССПЛОТ
ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ИЗ
ГМ ОТ **КАПИЛЛЯРНОГО**
ДАВЛЕНИЯ

1

Задаем фильтры:

- Коллектор (NTG) = 1;
- Крайние точки насыщенности
 - $Sw \neq 1$
 - $Sw \neq 0$
- Исследуемый объект
 - Каждый горизонт исследуется отдельно)

Для одной и той же насыщенности получаем разные капиллярные давления при разных ФЕС

Заданные фильтры свойств

Zone

☐ Фильтровать по самому себе

☒ ARRZONE

> 4

H

☐ Фильтровать по самому себе

☒ H

> 0,05

SW

☐ Фильтровать по самому себе

☒ ARRSWATINIT

< 0,99

PORO

☐ Фильтровать по самому себе

☒ PORO

> 0,0001

NTG

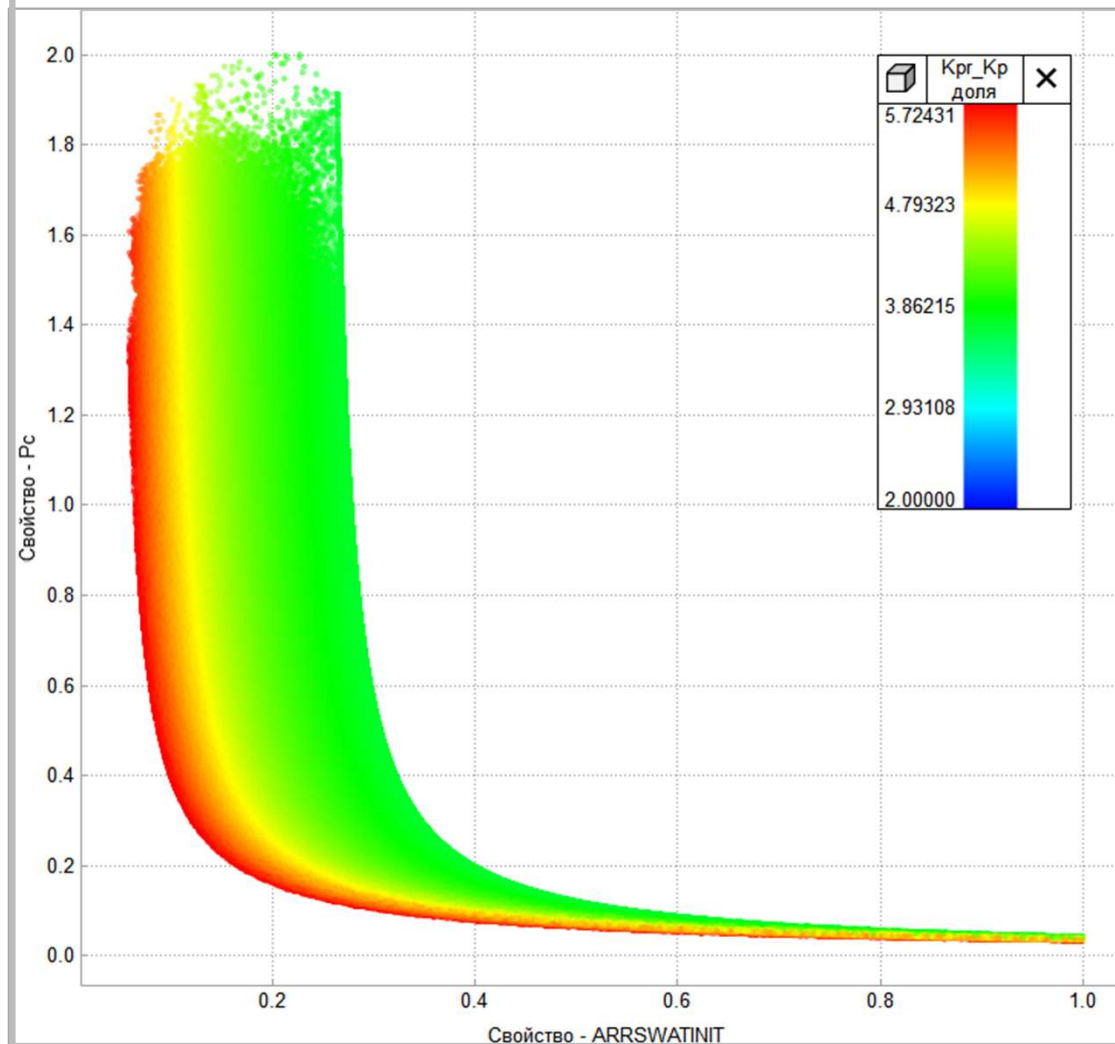
Дискретное свойство: NTG

Дискретный код

☐ Глина

☒ Песок

Кроссплот капиллярного давления от водонасыщенности. Цвет по значению $\sqrt{(K_{pr}/K_p)}$



УСЛОВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО НАСЫЩЕНИЯ БРУКСА-КОРИ В ГДМ

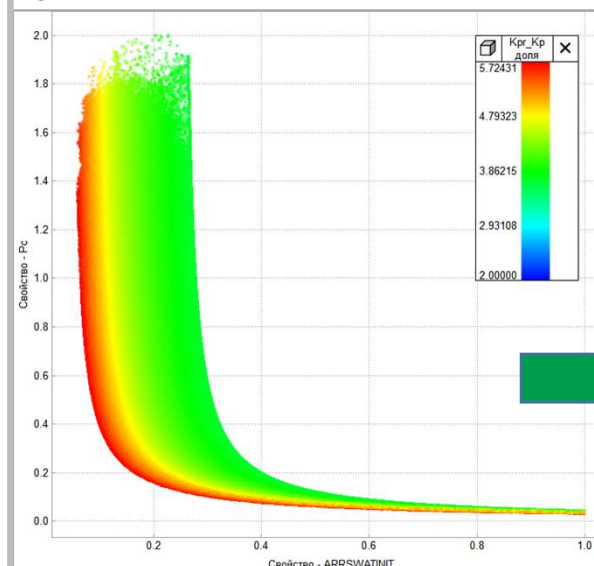
РЕМАСШТАБИРУЕМ
ВОДОНАСЫЩЕННОСТЬ ПО
МИНИМАЛЬНОЙ
ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ

2

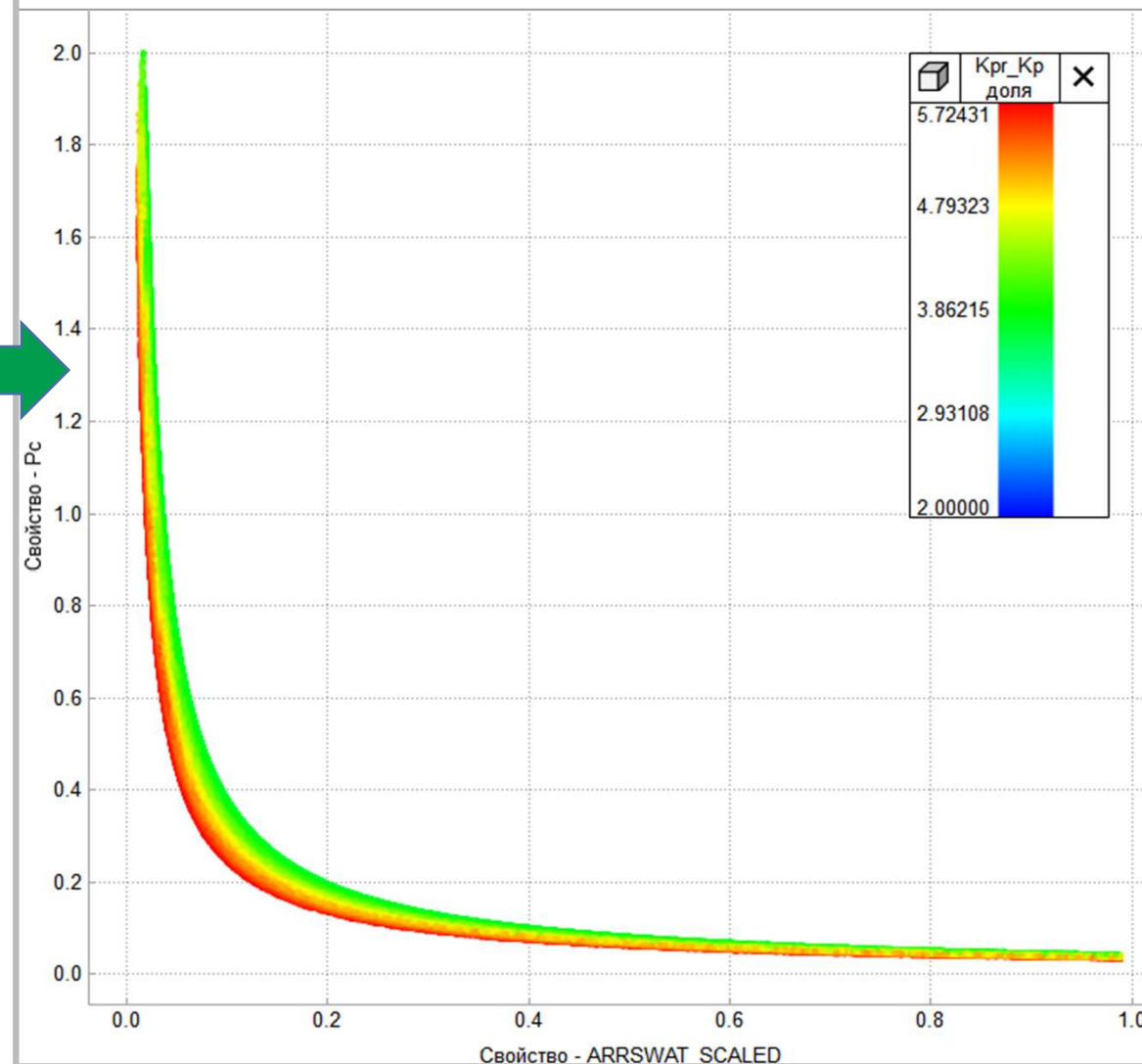
Нормируем насыщенность
в каждой ячейке по
значению SWL
(принимается что SWU =1)

$$ARRSWAT_SCALED = \frac{S_w - S_{wl}}{1 - S_{wl}}$$

Исходный кроссплот значений



Итоговый кроссплот значений капиллярного давления от нормированной водонасыщенности



Образец калькулятора свойств (workflow)

Арифметика

Сетка:

Результирующее свойство:

☐ Дискретная

☐ Фильтр

$ARRSWAT_SCALED = (ARRSWATINIT - SWL) / (1 - SWL)$

0

U

U

УСЛОВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО НАСЫЩЕНИЯ БРУКСА-КОРИ В ГДМ

ПОИСК КОРРЕЛЯЦИИ С ФЕС (В ДАННОМ СЛУЧАЕ С ПАМЕТРОМ $\sqrt{(K_{pr}/K_p)}$) 3

Выбираем область по оси x (предлагаемые критерии – наибольшая плотность точек, широкий диапазон значений капиллярного давления).

Область должна иметь минимальную ширины ($\sim 0,0001$)

Пример выбранной области в диапазоне насыщенности

☐ Фильтровать по самому себе

☒ ARRSWAT_SCALED

> 0.1

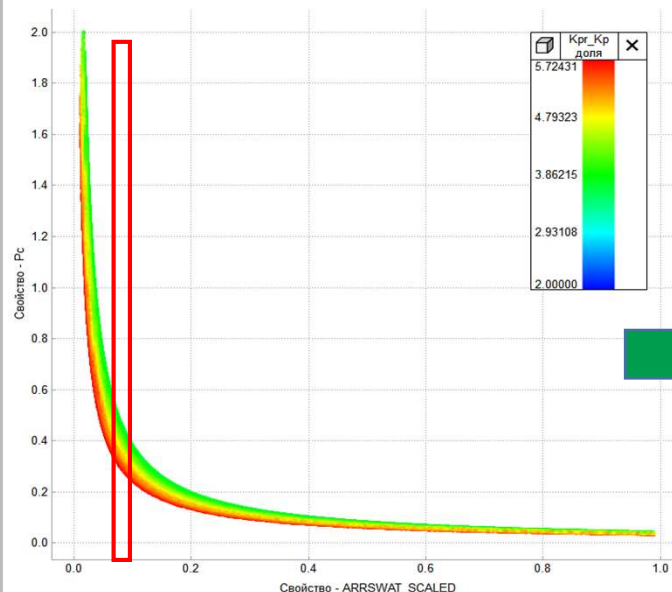
Непрерывный фильтр 2

☐ Фильтровать по самому себе

☒ ARRSWAT_SCALED

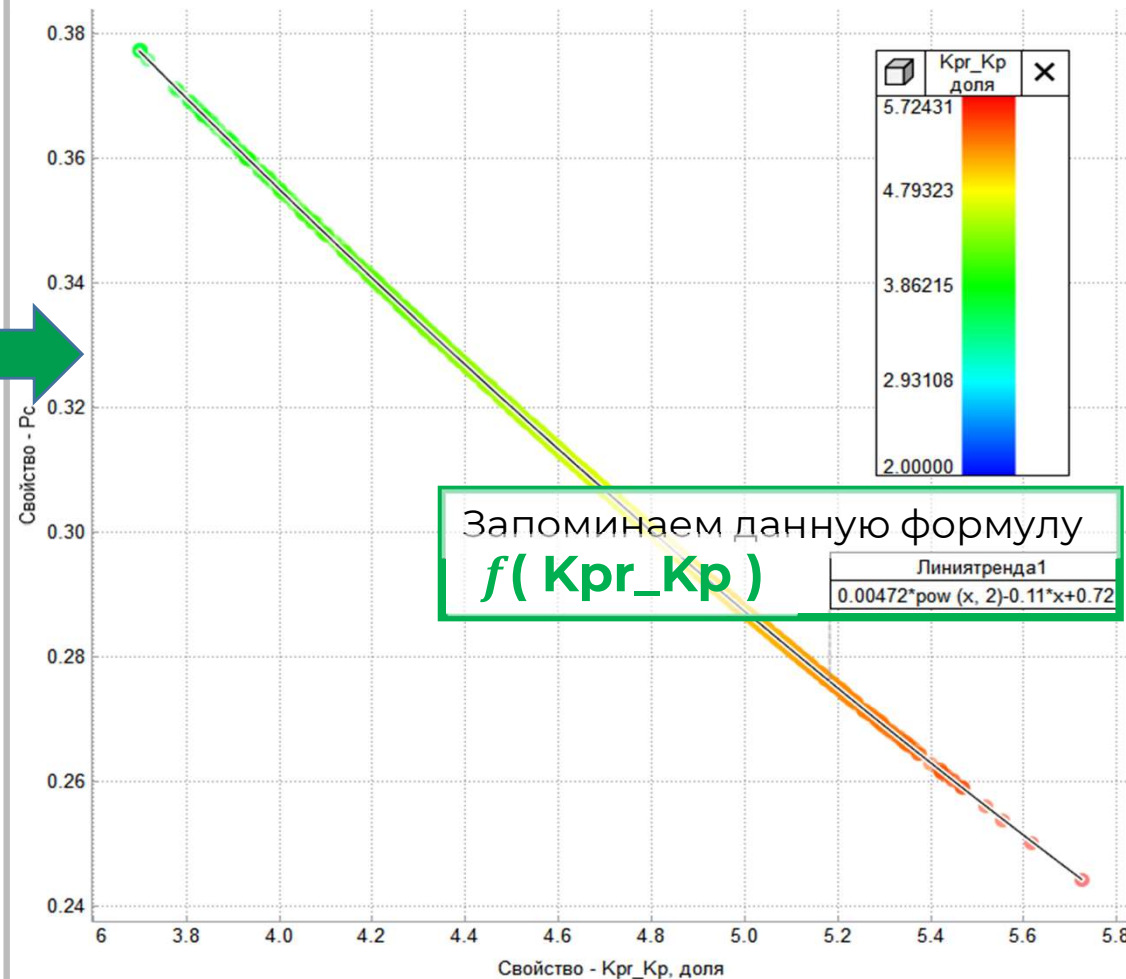
< 0,1001

Пример выбранной области в диапазоне насыщенности



В выбранном диапазоне нормированной по SWL водонасыщенности (фильтр свойства $[0,1000;0,1001]$) строим кроссплот капиллярного давления (P_c) от характеристики ФЕС ($\sqrt{(K_{pr}/K_p)}$)

Пример выбранной области в диапазоне насыщенности

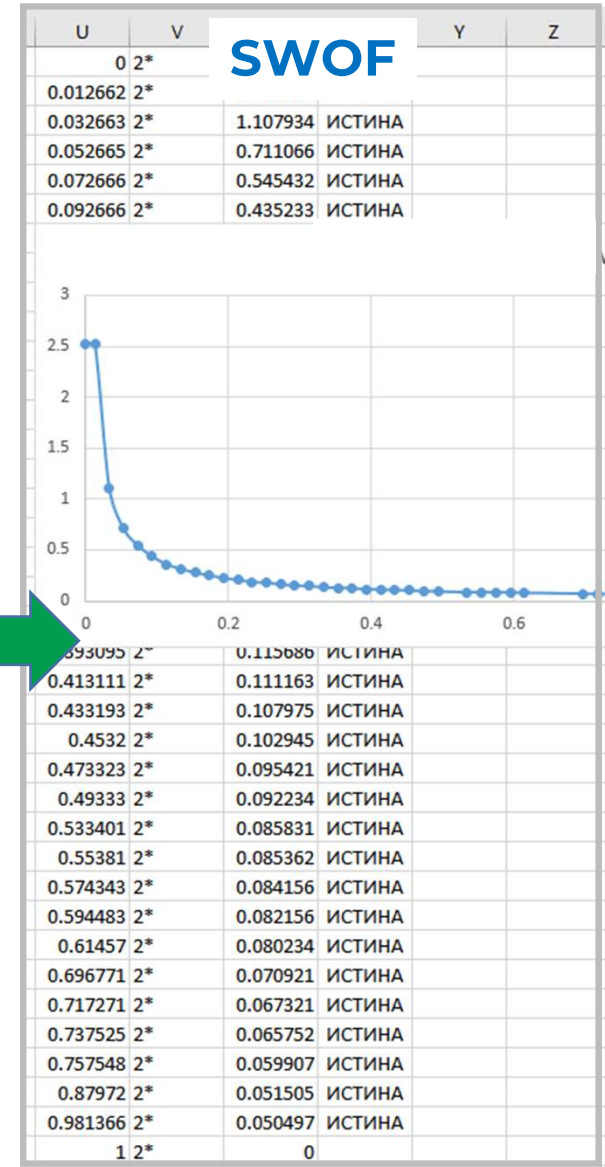
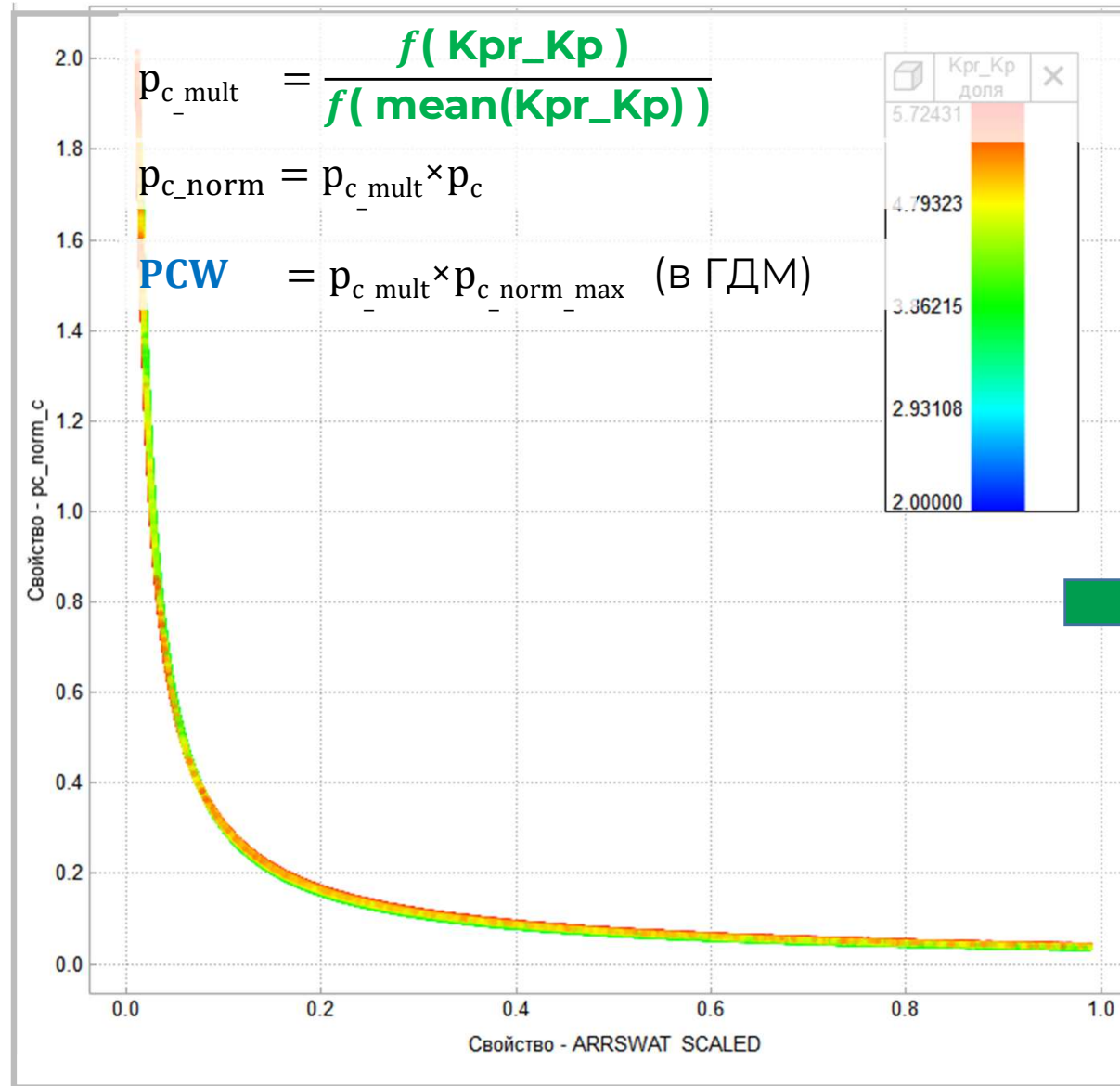


УСЛОВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО НАСЫЩЕНИЯ БРУКСА-КОРИ В ГДМ

Расчет нормированной ККД по минимальной водонасыщенности и максимальному капиллярному давлению

4

- Рассчитываем p_{c_corr} , берем формулу из линии тренда прошлого пункта и вставляем в калькулятор.
 - В знаменателе та же формула, но вместо куба "Kpr_Kp" – среднее значение "Kpr_Kp" в рассматриваемом фильтре водонасыщенности (в примере 4,75)
- Строим кроссплот ремасштабированного капиллярного давления (p_{c_norm}) от нормированной водонасыщенности (ARRSWAT-SCALED)
- Переносим данный кроссплот в таблицу SWOF (капиллярное давление от водонасыщенности) в виде таблицы (сокращаем количество точек или переводим в степенную функцию).



УСЛОВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО НАСЫЩЕНИЯ БРУКСА-КОРИ В ГДМ

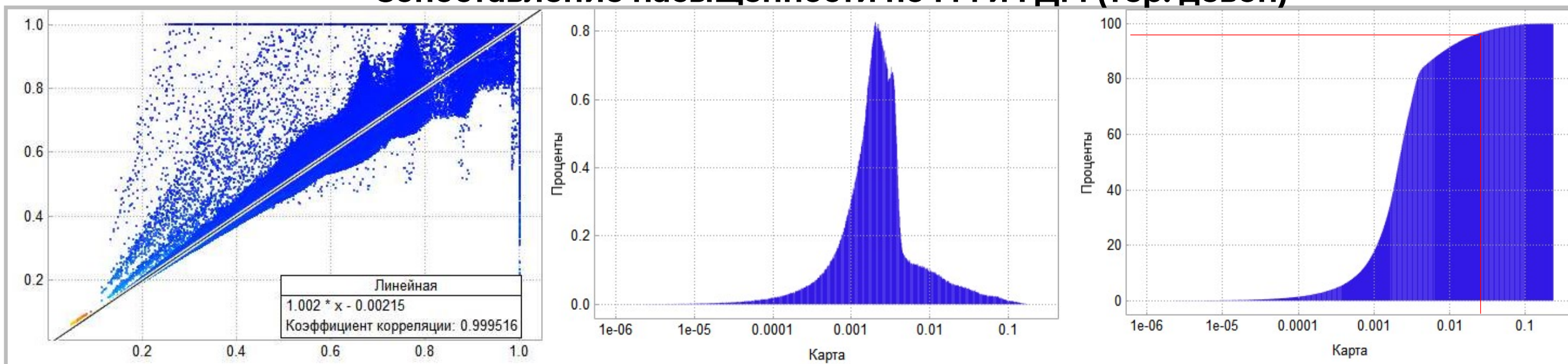
Таким образом в ГДМ задается:

- 1) SWL зависимость как в геологии
- 2) PERM и PORO зависимости как в геологии
- 3) SWOF (масштабированная таблица капиллярной кривой) из последнего пункта.
- 4) PCW из последнего пункта

Типичные ошибки:

- 1) Нефизичные корреляции (или её отсутствие) – с ростом ФЕС максимальное капиллярное давление системы монотонно растем
- 2) Неправильное задание ВНК или ЗСВ
- 3) Неправильный выбор области водонасыщенности и среднего значения $K_{пр_Кп}$ в ней

Сопоставление насыщенности по ГМ и ГДМ (тер. девон)



Урок от тНавигатор по построению равновесной и неравновесной инициализации с разбором основных особенностей методик

- <https://youtu.be/Pt0Fg-RQar4?si=YCfgnuBJGEoo86bc>
- https://youtu.be/zz8QcAzC-so?si=umiLDw_3gHE1ECWU

Методика построения насыщенности в ГМ (затрагиваются большинство методик достаточно подробно)

- <https://www.youtube.com/live/UTpEBybpqLE?si=ON2qiKbbM1p1HSOU>



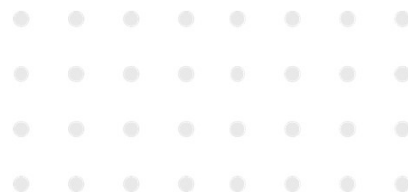
Построение модели насыщения Брукс-Кори и ее равновесная инициализация в ГДМ


Ведущий инженер ПАО Татнефть
Файзрахманов Галим
+7 926 893-35-93
FayzrakhmanovGG@tatneft.ru

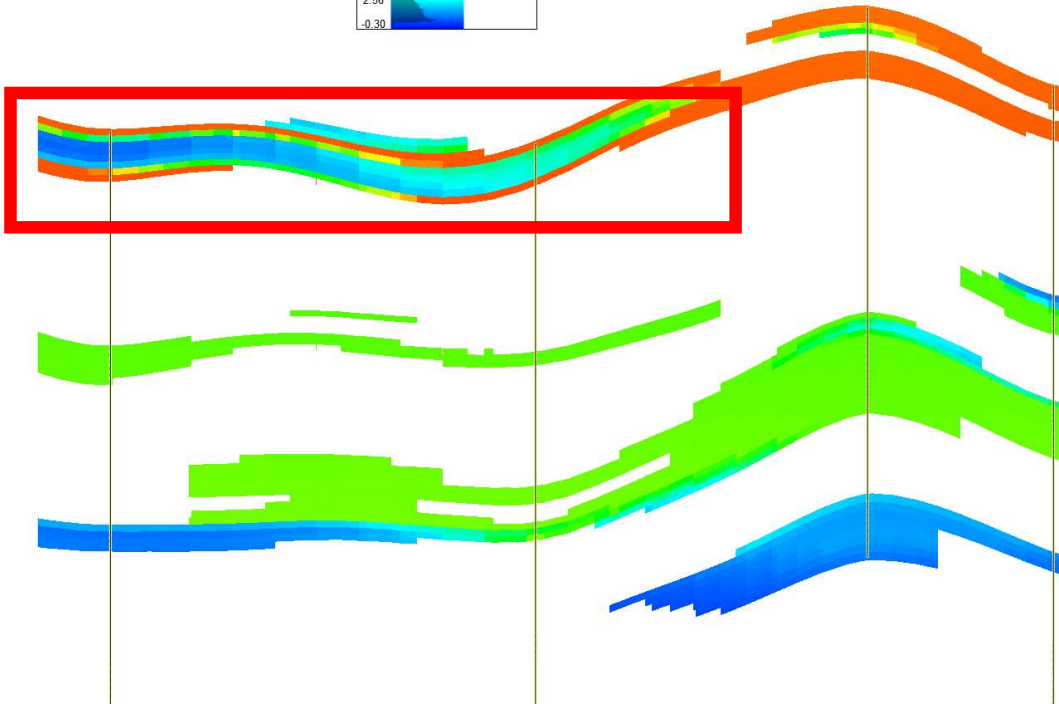
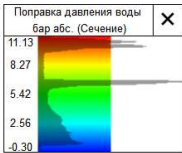
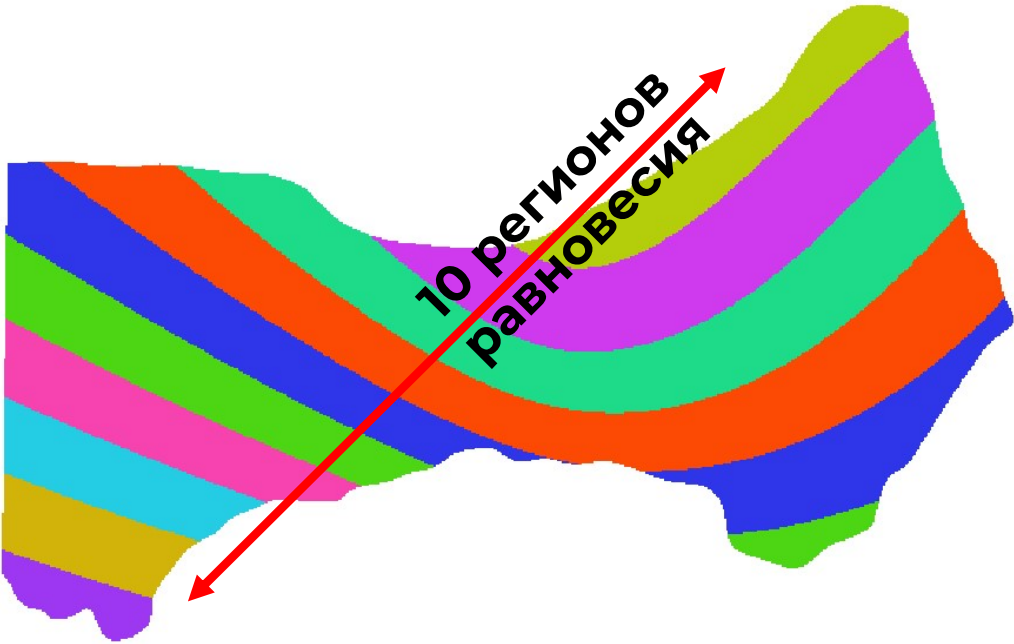
Инженер 1 категории ПАО Татнефть
Еремеев Данил
+7 927 046-17-41
EremeevDV@tatneft.ru

Ведущий инженер ПАО Татнефть
Мавлявов Ильнур
+7 917 920-34-38
MavlyavovIR@tatneft.ru

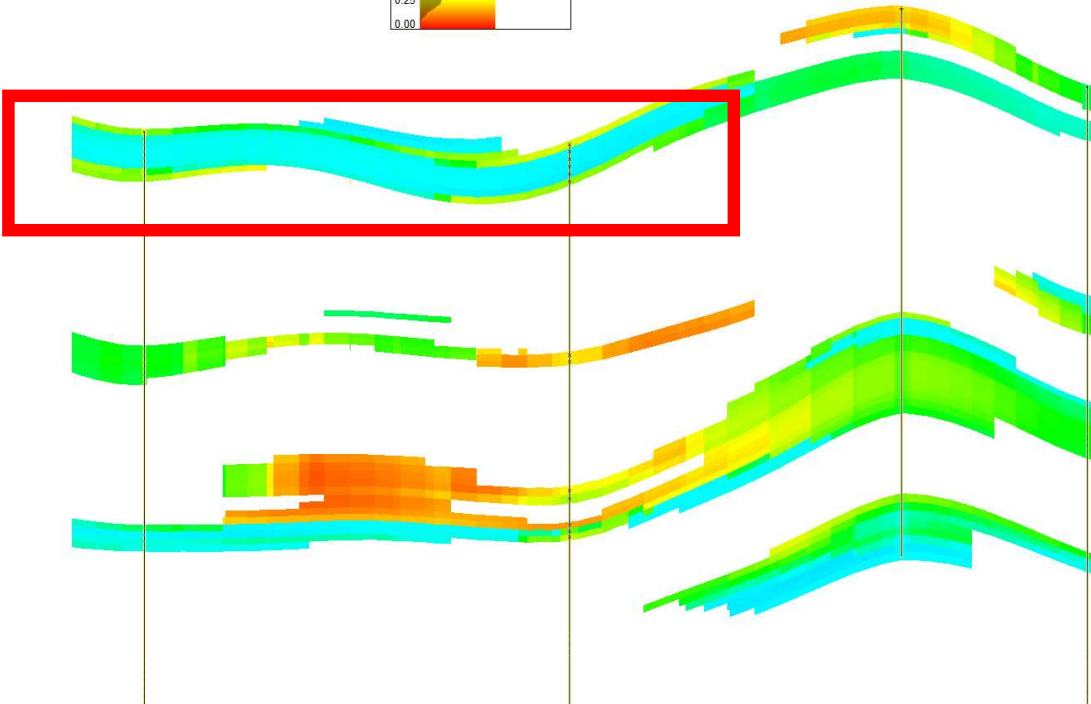
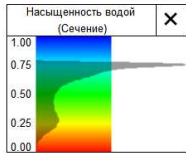
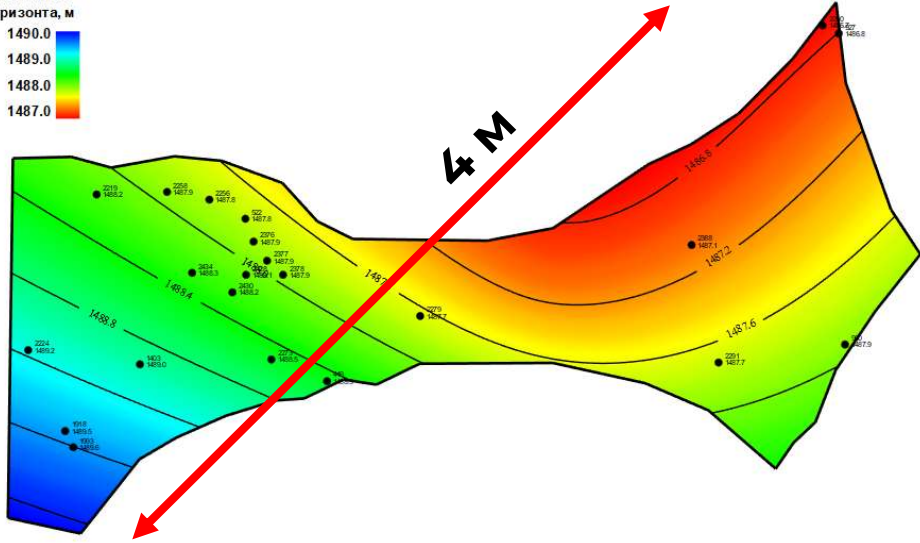
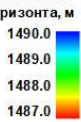
**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ**



	EQLNUM	×
	0	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	



Карта
поверхности
ВНК
пашийского
горизонта, м



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО НАСЫЩЕНИЯ. УСКОРЕННЫЙ МЕТОД

Поиск корреляции
максимального
капиллярного давления
по готовому кубу
водонасыщенности

3

- На кроссплот капиллярного давления от нормированной водонасыщенности добавляем степенную линию тренда (тип зависимости не играет роль – главное сохранять физичность)

- Получаем куб PCW_TREND – куб тренда (вероятного значения) капиллярного давления при нормированной водонасыщенности.

- PCW_HACK =

$P_{c_max} * (P_c / PCW_TREND)$ - куб максимального капиллярного давления передаваемый в ГДМ.

- Данный куб стоит ограничить от слишком больших и маленьких значений без значительного влияния на распределение.

PCW_TREND – зависимость описанная линией тренда

$PCW_HACK = P_{c_max} * (P_c / PCW_TREND)$

Напр. $PCW_TREND = 2.2 * (0.038 * Pow(SWAT_SCALED, (-0.91)))$

Pc_max

PCW_TREND

