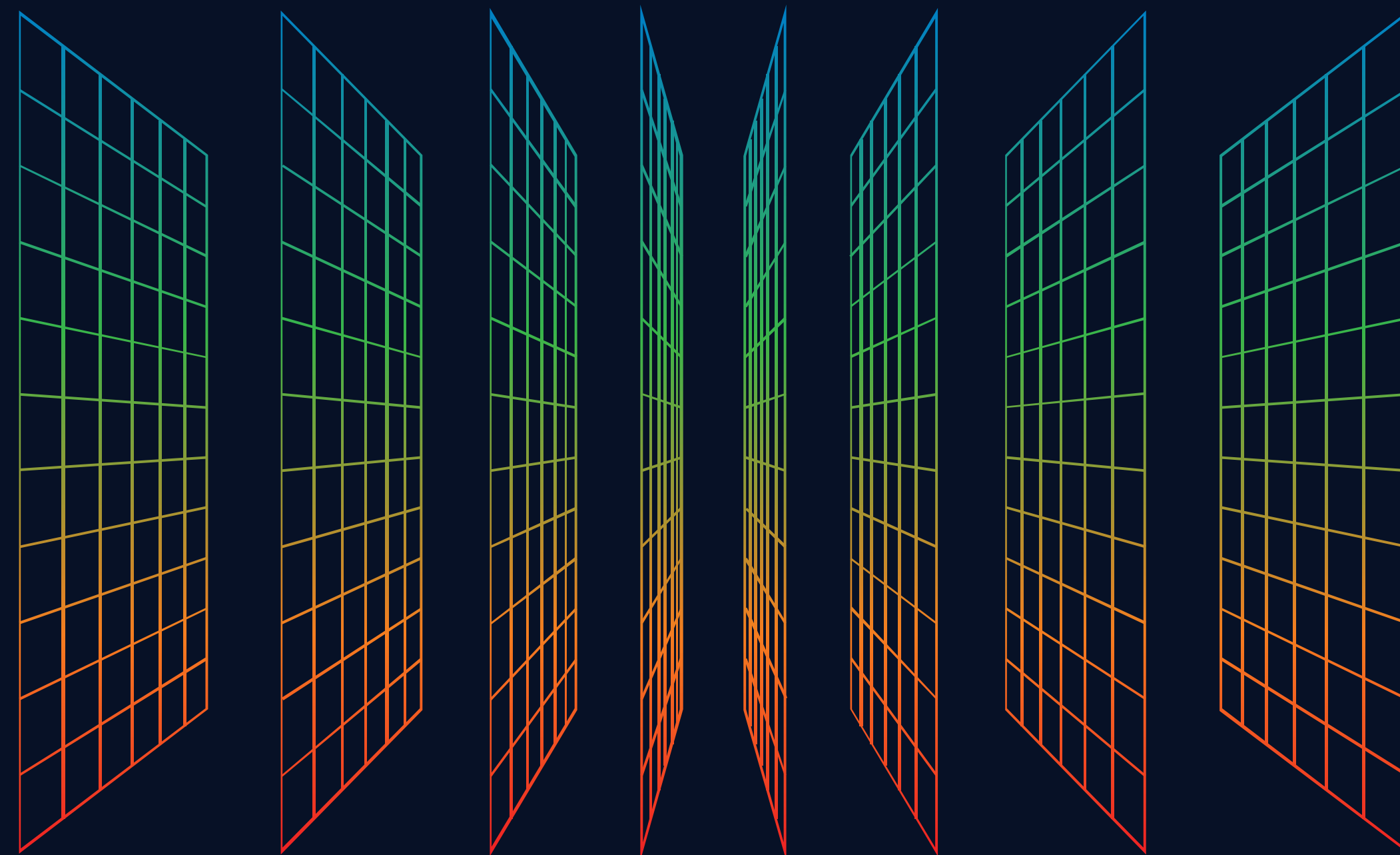


# Моделирование закачки CO<sub>2</sub> в tНавигатор



22 июня 2023



# Содержание

---

- **Введение: актуальность проектов по закачке CO<sub>2</sub>**
- **Основные механизмы депонирования CO<sub>2</sub>**
- **Выбор подходящей опции моделирования закачки CO<sub>2</sub>**
- **EOR с закачкой CO<sub>2</sub>. WAG. Поддержание указанной доли CO<sub>2</sub>**
- **Дополнительные опции: геомеханика, твёрдая фаза. Возможности визуализации**
- **Выводы**

# Содержание

# Введение. Актуальность проектов по закачке CO<sub>2</sub>.

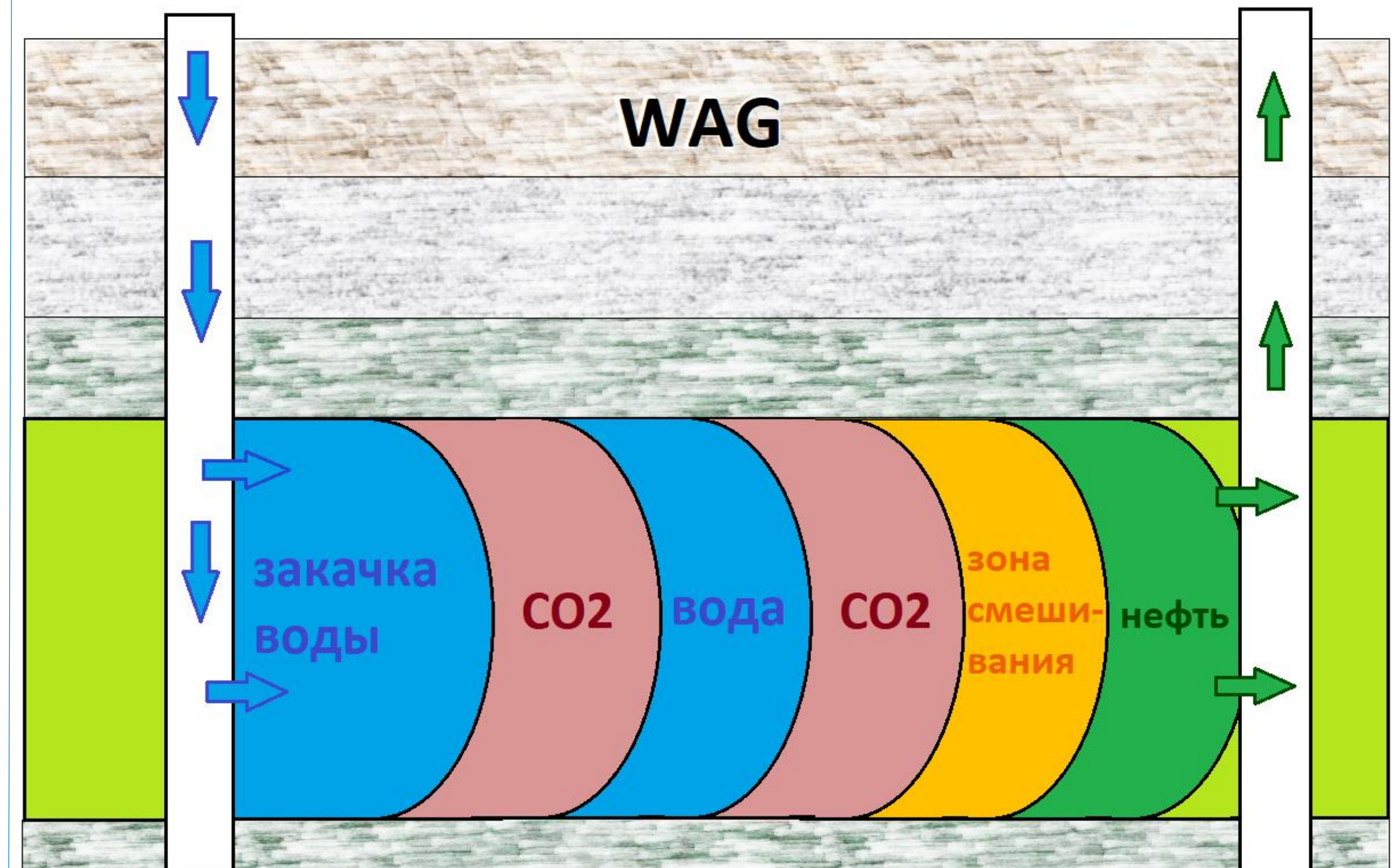
## Утилизация CO<sub>2</sub>

- Необходимость эффективной утилизации CO<sub>2</sub> очевидна по экологическим соображениям



## Повышении нефтеотдачи

- Закачка CO<sub>2</sub> способна повысить нефтеотдачу пласта, снизив вязкость и плотность нефти, а также поверхностное натяжение



# Проекты по закачке CO2 в мире

Страны-лидеры по проектам CCS в 2020	Объем закачки (Мтпа)	Количество проектов	Тип захоронения		
			EOR	Геологическое	Утилизация
 США	27,2	24	95%	4%	
 Австралия	4,3	5		93%	7%
 Канада	4,3	8	72%	28%	
 Бразилия	3,0	1	100%		
 Китай	2,3	12	85%	15%	
 Норвегия	1,7	3		100%	
 Саудовская Аравия	1,3	2	100%		
 ОАЭ	0,8	1	100%		
 Хорватия	0,6	2	100%		
 Швеция	0,5	1		100%	
Остальной мир	Нет данных	9		100%	

# Почему возникают проекты по закачке CO<sub>2</sub>?

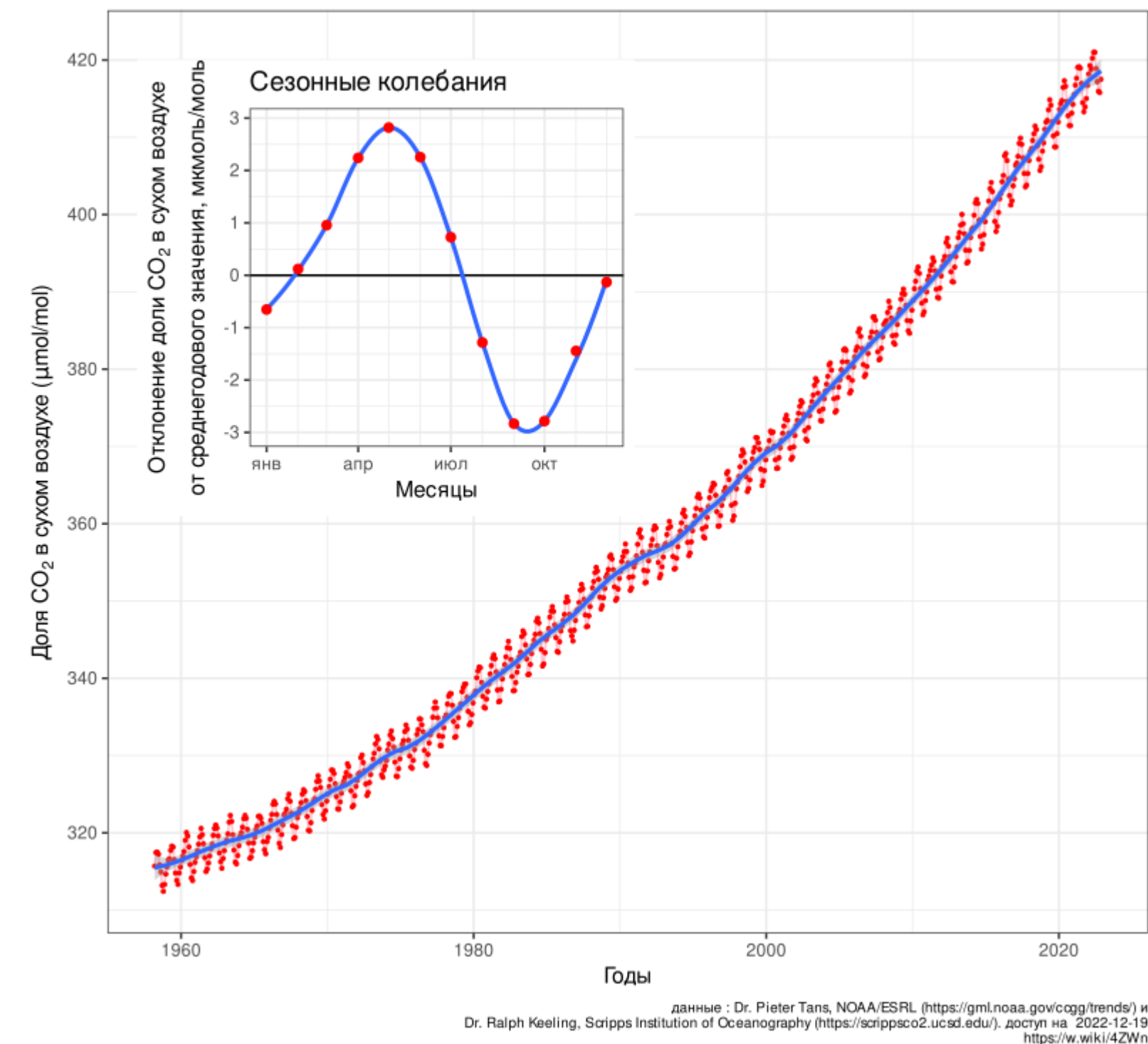
Концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли растёт год от года.

Во многих странах возникают законодательные нормы и инициативы, стимулирующие проекты по утилизации CO<sub>2</sub>.

Причины закачки углекислоты под землю:

- Налоговые льготы
- Концентрация CO<sub>2</sub> в добытом газе, превосходящая ограничение для продажи газа
- Квоты на выбросы CO<sub>2</sub>
- Создание «экологичного» имиджа компании
- Повышение нефтеотдачи: поддержка давления, снижение вязкости и плотности нефти

Среднемесячная и среднегодовая концентрации CO<sub>2</sub>  
Мауна Лоа, Гавайи 1958 - 2022



Концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли растёт год от года.

# Проекты по закачке и контролю за CO<sub>2</sub> в России

Россия находится на пятом месте в мире по выбросам CO<sub>2</sub> в атмосферу (~ 5%).  
- EDGAR, 2021

Сахалинский эксперимент: остров станет областью с нулевым выбросом CO<sub>2</sub>. Выбросы от промышленности, ТЭК и транспорта должны не превышать поглотительные способности местной экосистемы.

Будут созданы лимиты на выбросы CO<sub>2</sub>, и компании могут продавать друг другу неиспользованные квоты. При превышении назначается штраф. На примере Калифорнии показано, что квоты активно стимулируют развитие «зеленых» технологий и способов снижения выбросов.

Затем опыт планируется распространить на другие регионы.

О желании присоединиться к проекту уже заявили Башкирия, Хабаровский край, Иркутская и Калининградская области.

1 сентября 2022, 00:22

## На Сахалине начался климатический эксперимент по ограничению выбросов парниковых газов

Эксперимент продлится до 31 декабря 2028 года

### «Газпром нефть» раскрыла детали российского проекта улавливания CO<sub>2</sub>

На первом этапе он позволит закачивать под землю до 1 млн т углекислого газа

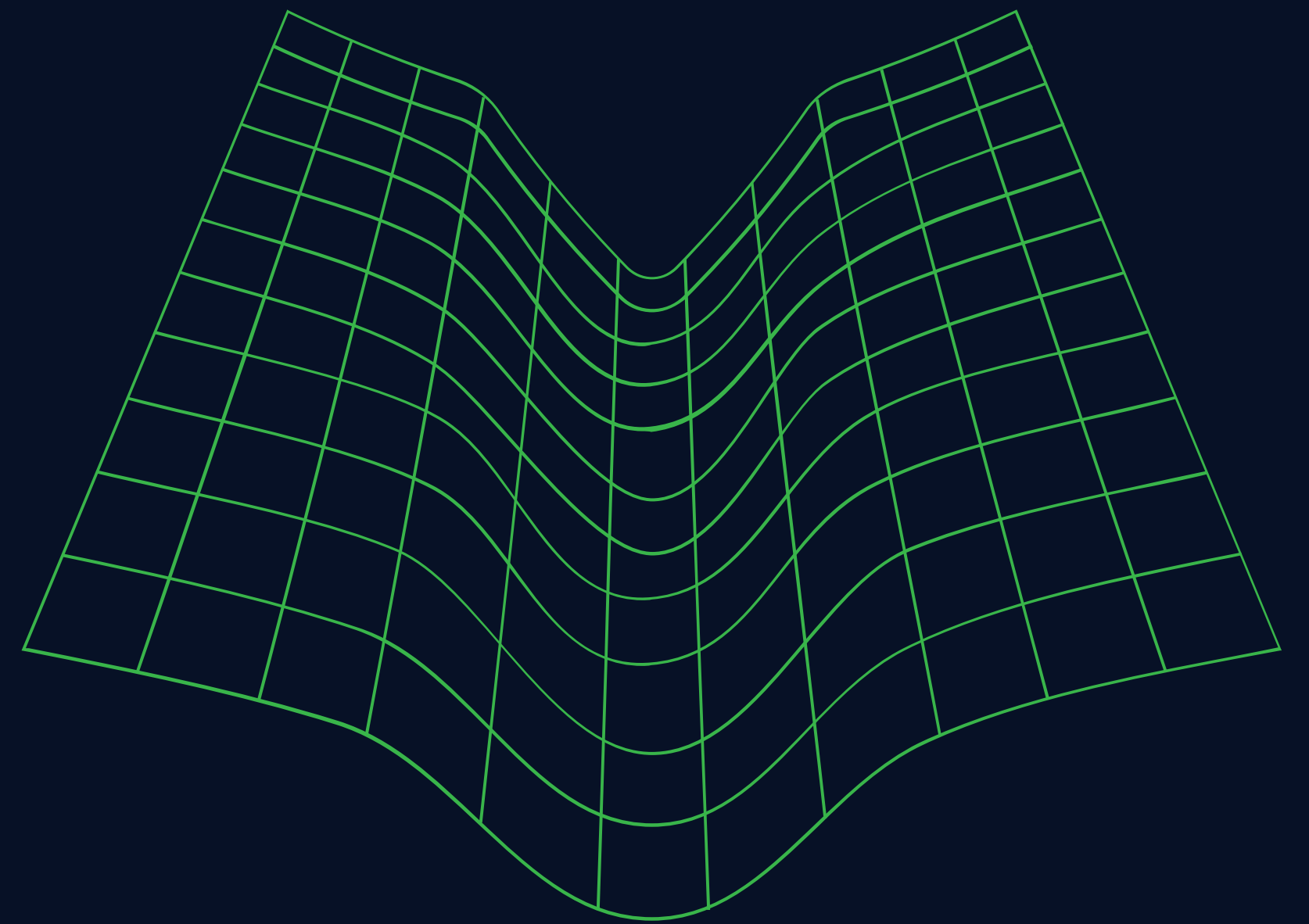
«Подземные резервуары,

которые есть [на месторождении в Оренбургской области], позволят закачивать до 50 млн т углерода в год», – уточнил Дюков.

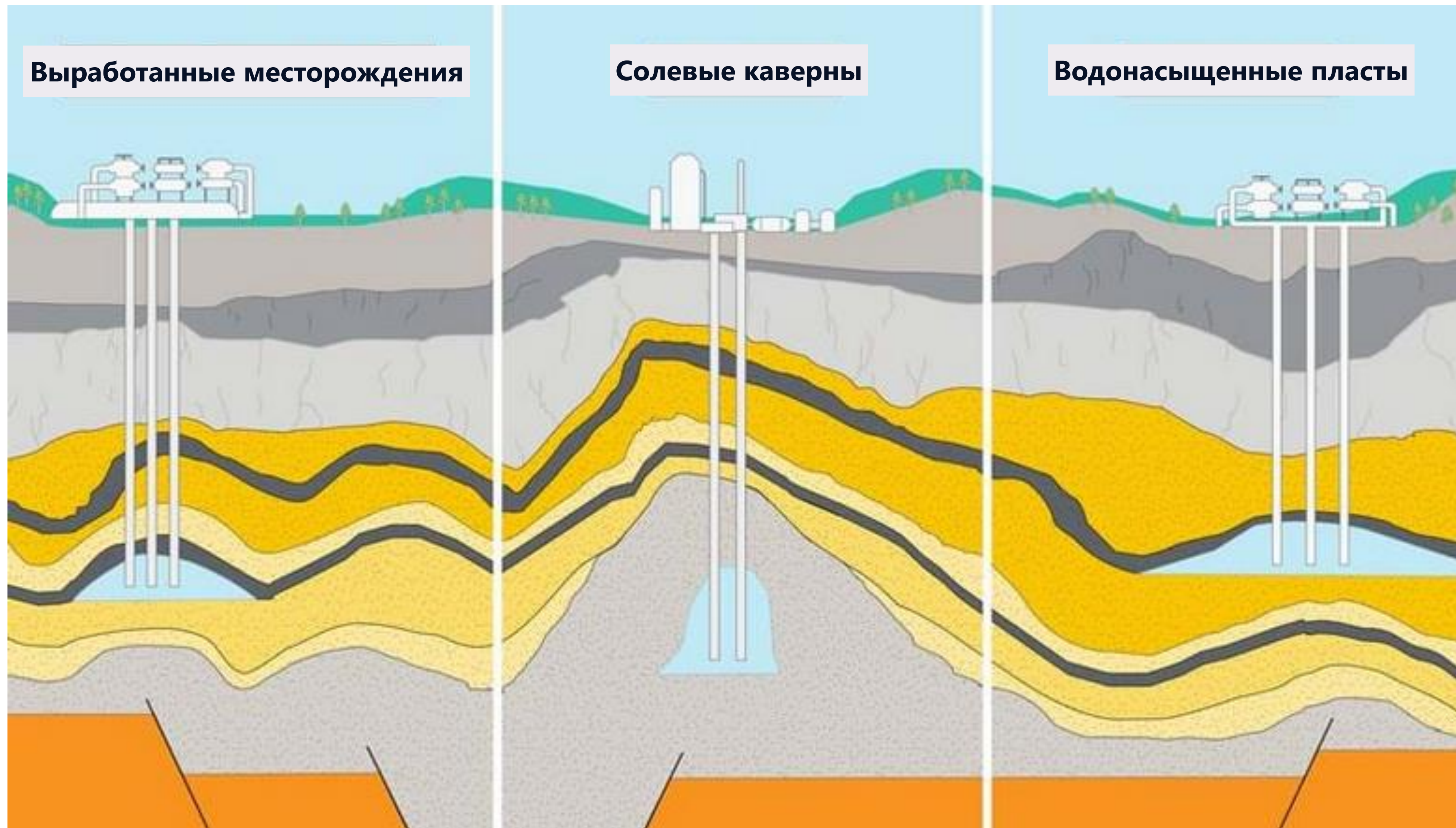
При этом у «Газпром нефти» в Сербии уже есть проект по сбору и очистке природного газа с высоким содержанием углекислого газа с объемом закачки около 100 000 т CO<sub>2</sub> в год. NIS – совместное предприятие российской компании и Республики Сербии

Зачем «НОВАТЭК» и «ЛУКОЙЛ» хотят собирать газ под землей и чем это грозит

# Основные механизмы депонирования CO<sub>2</sub>



# Где можно хранить CO<sub>2</sub>?

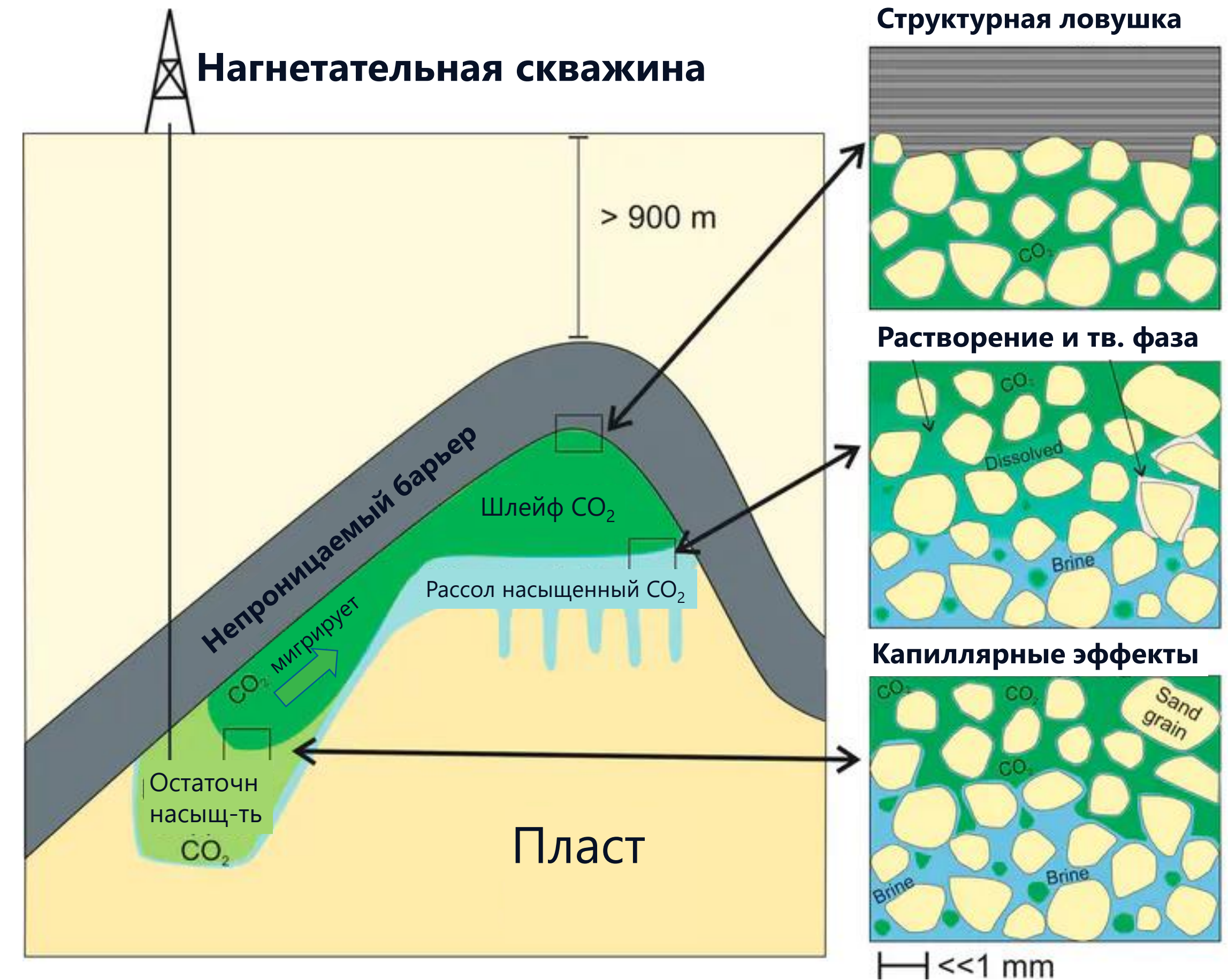




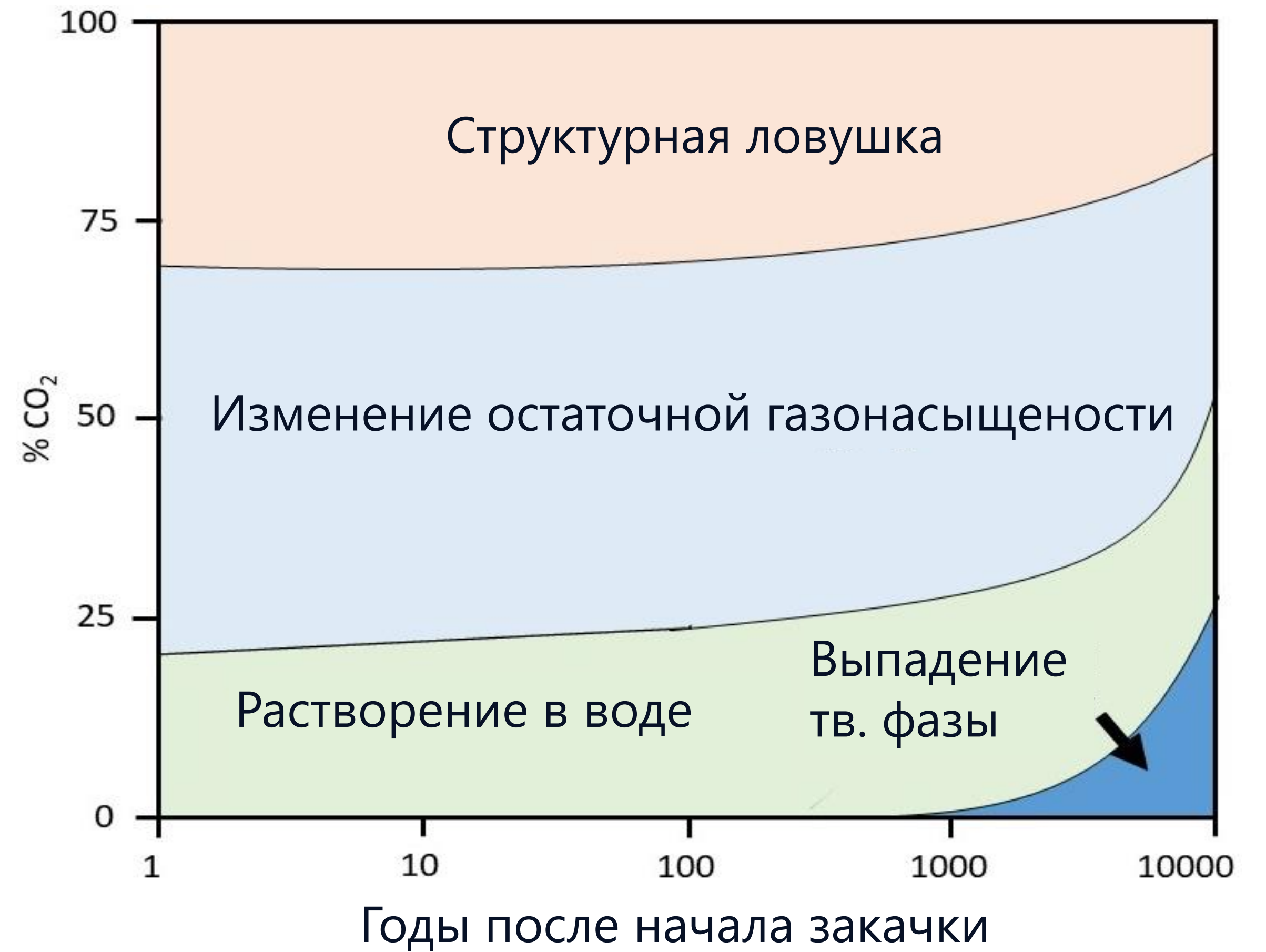
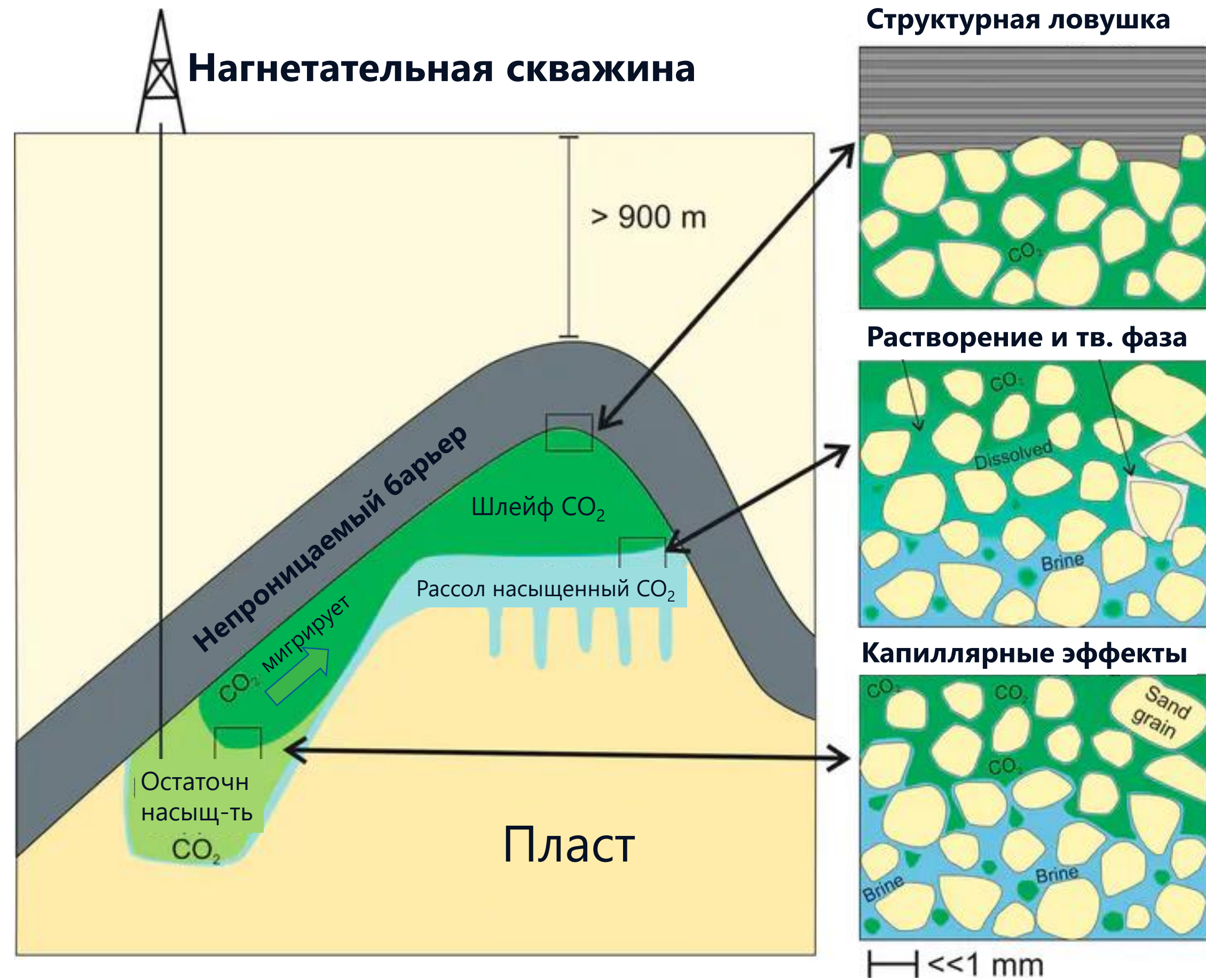
# Захоронение CO<sub>2</sub>

## Основные механизмы улавливания CO<sub>2</sub>

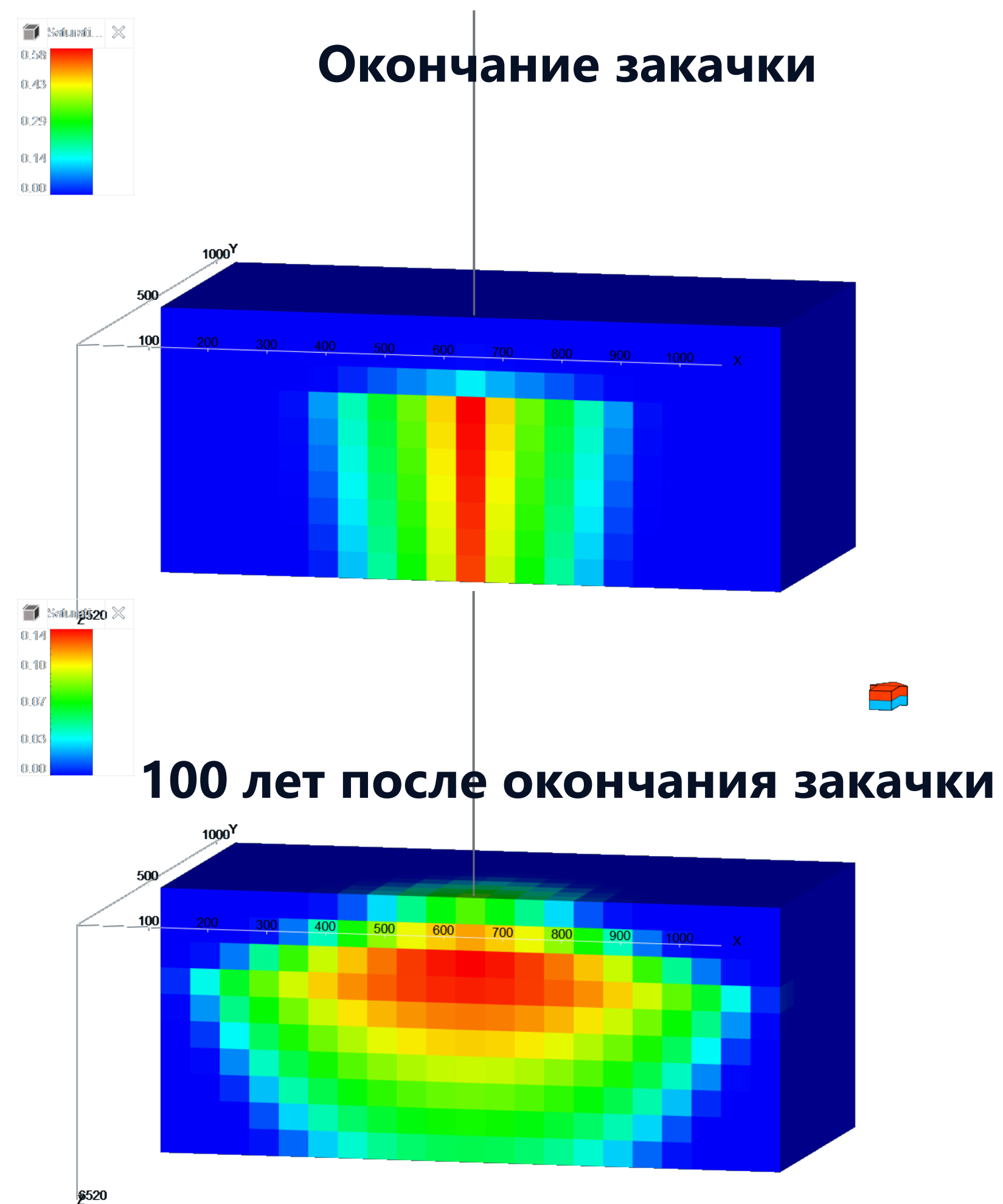
- Структурная ловушка
- Остаточная газонасыщенность ( $S_g < S_{gcr}$ )
- За счет растворения
- Минеральный



# Захоронение CO<sub>2</sub>



# Захоронение CO<sub>2</sub>: структурная ловушка



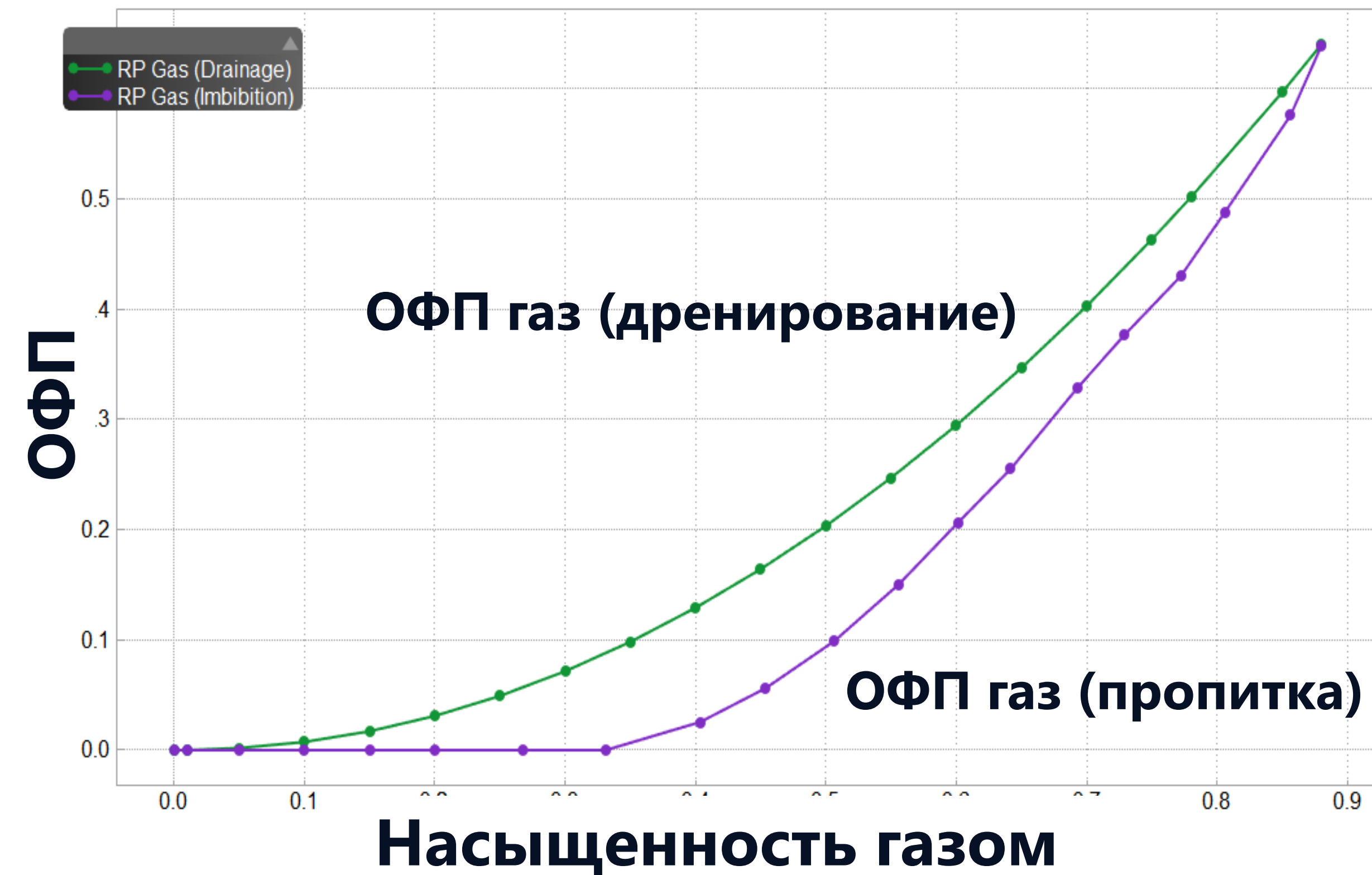
## Структурная ловушка:

Закачанный CO<sub>2</sub> постепенно мигрирует по пласту до тех пор пока не достигнет какого либо препятствия для дальнейшего движения (кровля пласта, непроницаемый разлом и т.д.)

**ТНавигатор** обладает всей необходимой функциональностью для моделирования:

- Структурной неопределённости
- Петрофизического моделирования
- Создания и обновления 3Д сеток
- Интеграция с симулятором

# Захоронение CO<sub>2</sub> : остаточная газонасыщенность



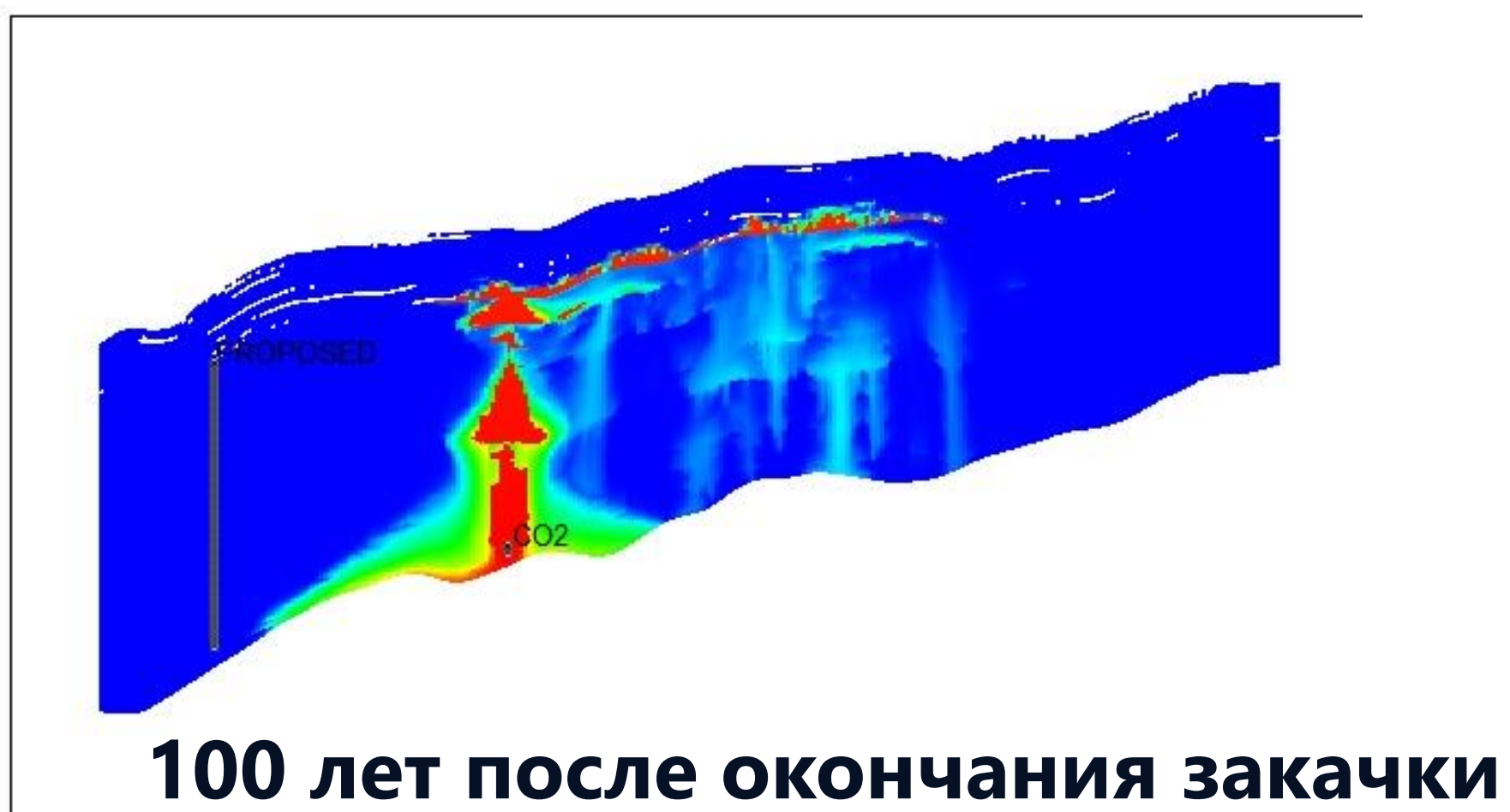
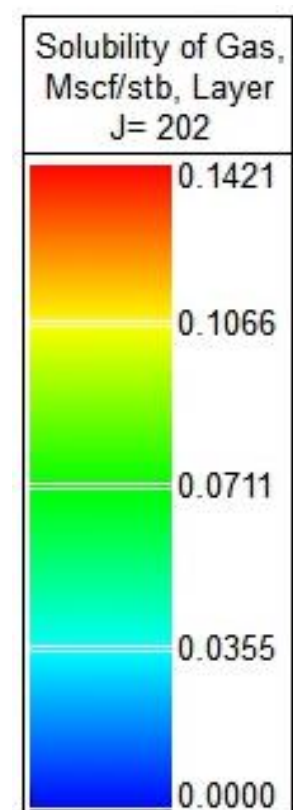
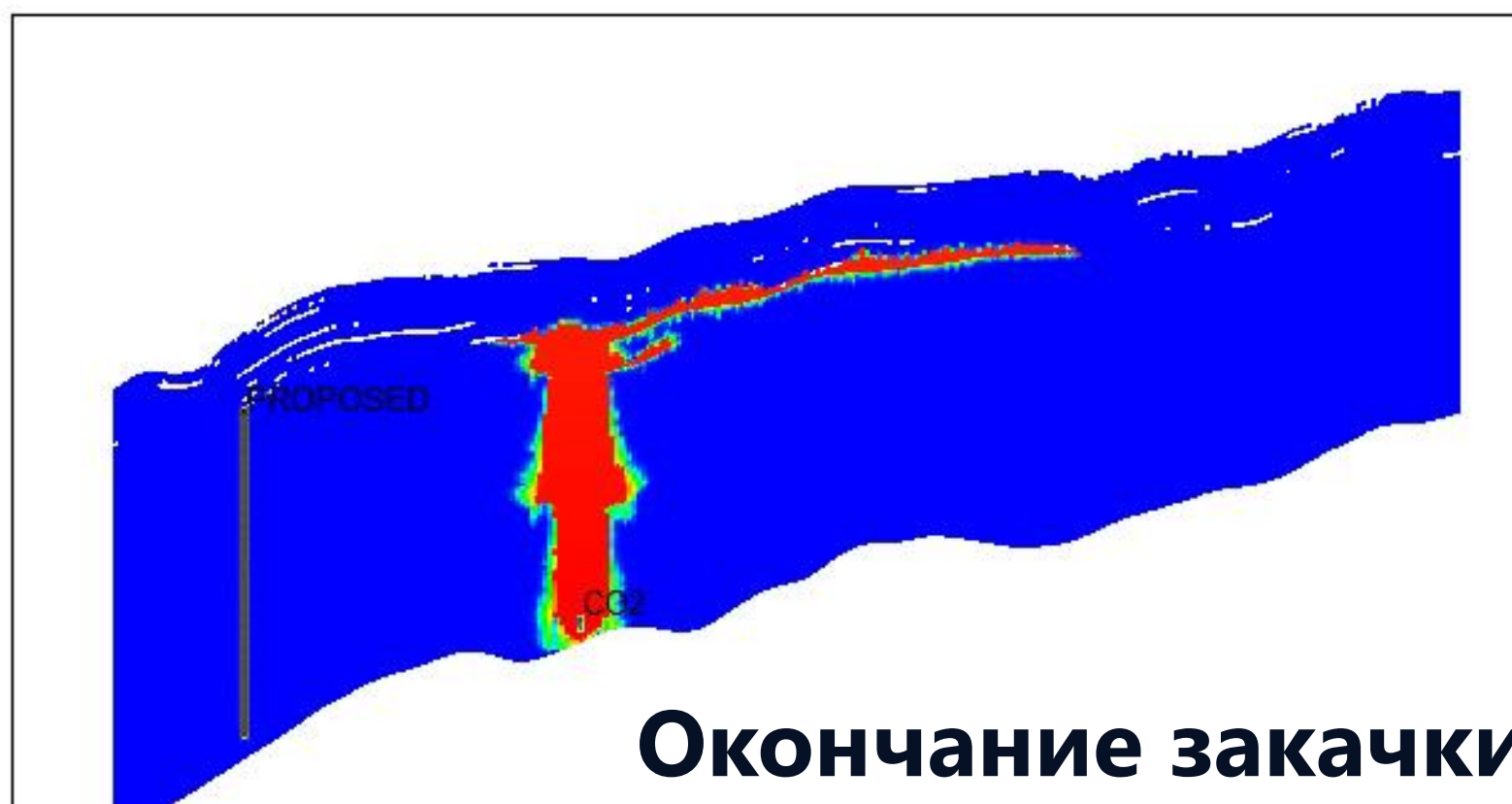
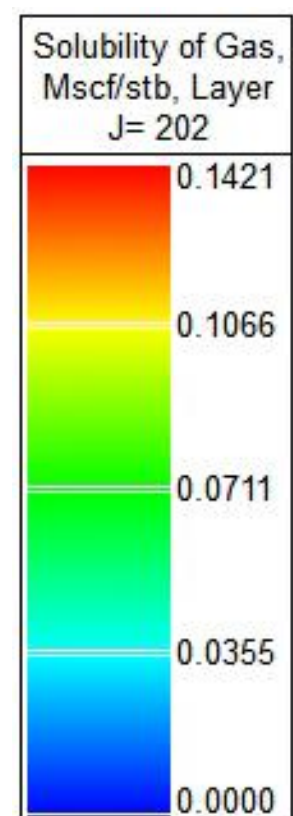
## Изменение остаточной газонасыщенности:

Закачанный CO<sub>2</sub> задерживается за счет сил капиллярного давления или гистерезиса, при котором CO<sub>2</sub> остается в пласте и изолируется по мере того, как фронт закачки CO<sub>2</sub> мигрирует по пласту

**ТНавигатор** обладает всей необходимой функциональностью для моделирования:

- Гистерезиса
- Создания ОФП
- Отображение масштабированных ОФП
- Параметры корреляций ОФП могут быть использованы при анализе неопределенности

# Захоронение CO<sub>2</sub> : растворение в воде



## Растворение:

CO<sub>2</sub> растворяется в пластовой воде. Опция включает расчёт свойств флюида с учётом растворения углекислого газа в воде, испарения воды и возможного присутствия солей.

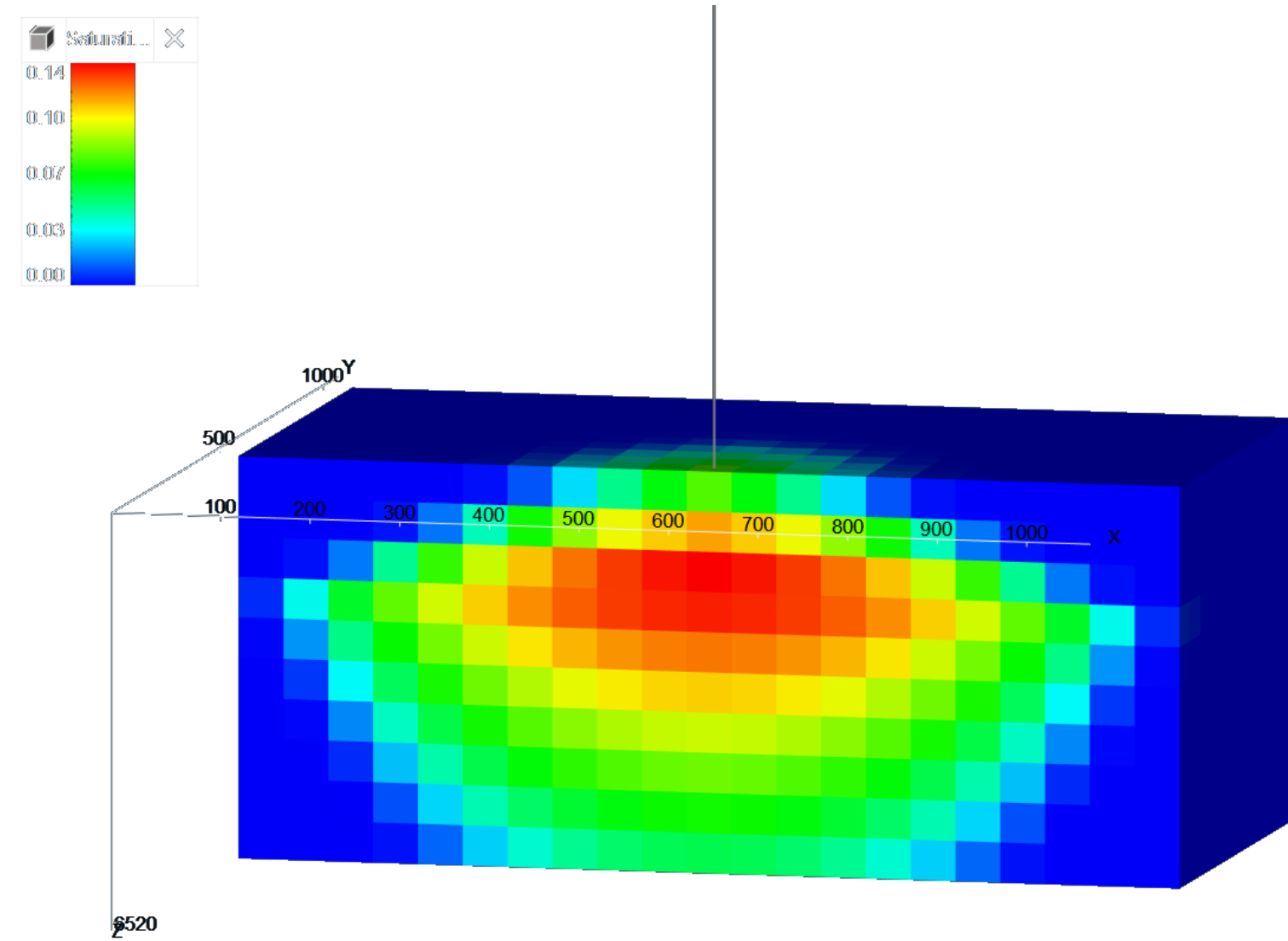
## Выпадение твердой фазы:

В течении длительного времени пластовая вода с растворённым CO<sub>2</sub> вступает в реакцию с солями в окружающей породе и постепенно образуется карбонат кальция.

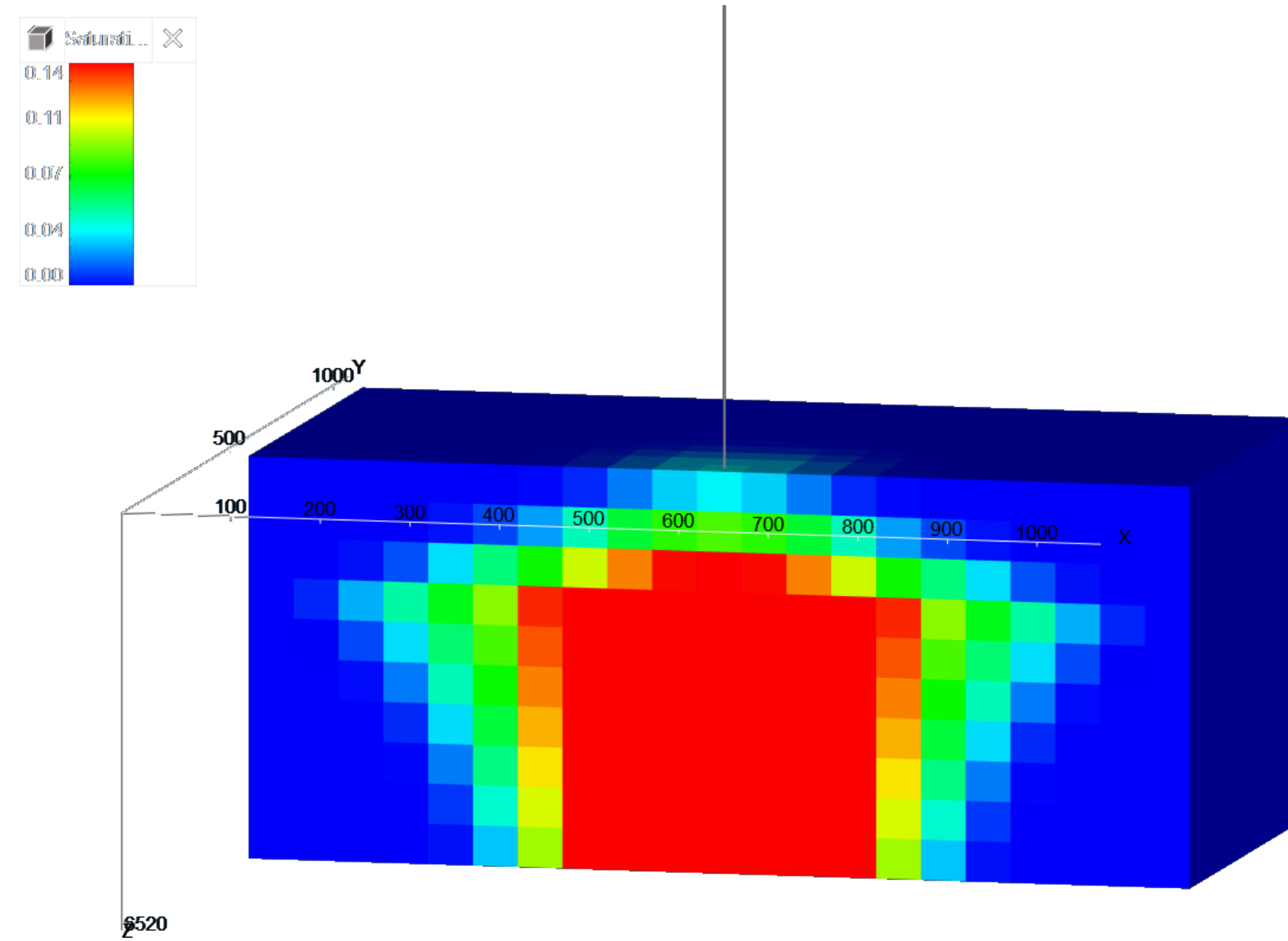
Для моделирования этого эффекта в **ТНавигатор** поддержано моделирование химических реакций как в виде твердых компонентов в EOS, так и с помощью опции многокомпонентной воды.

# Захоронение CO<sub>2</sub>

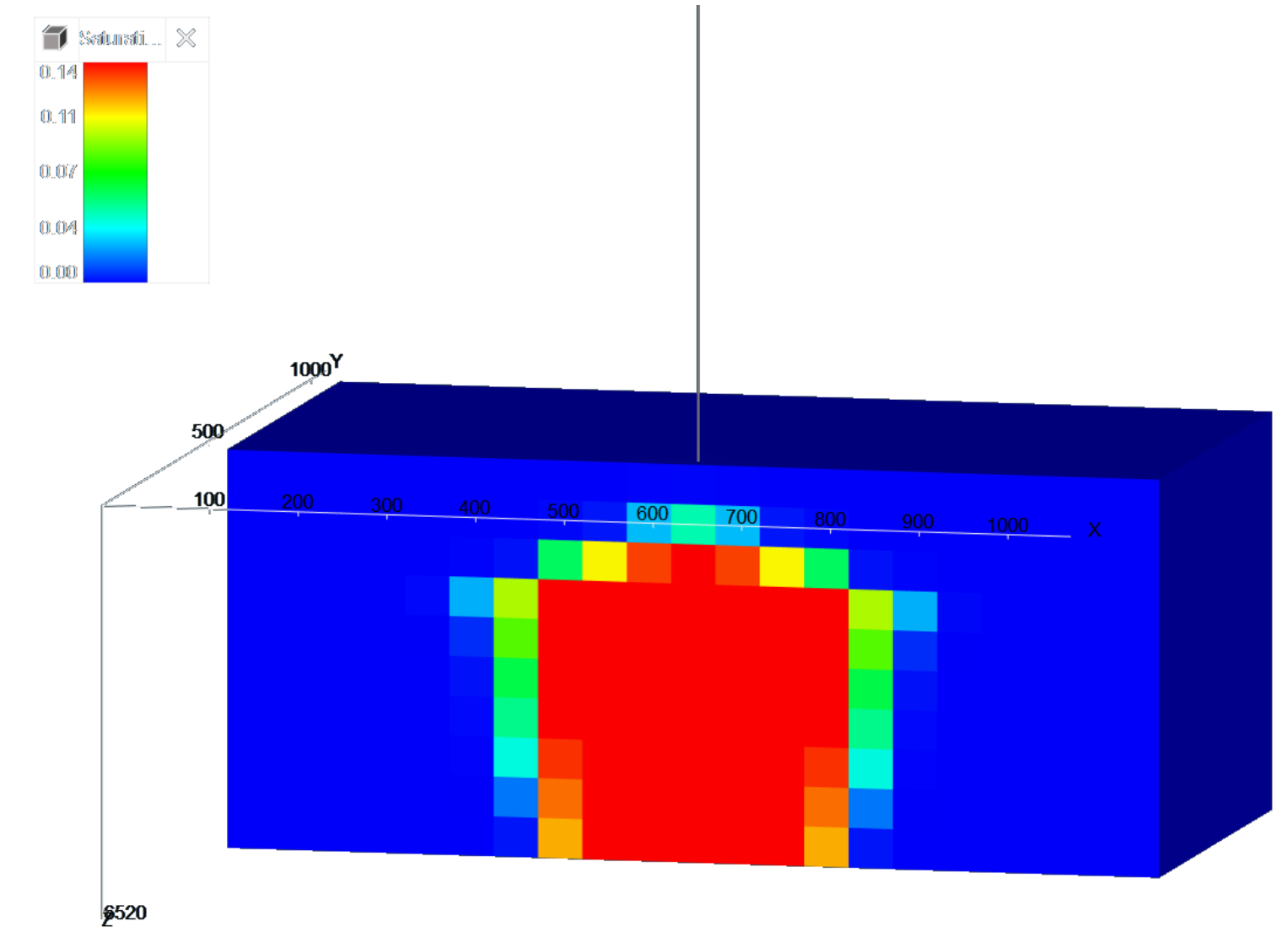
Структурная ловушка



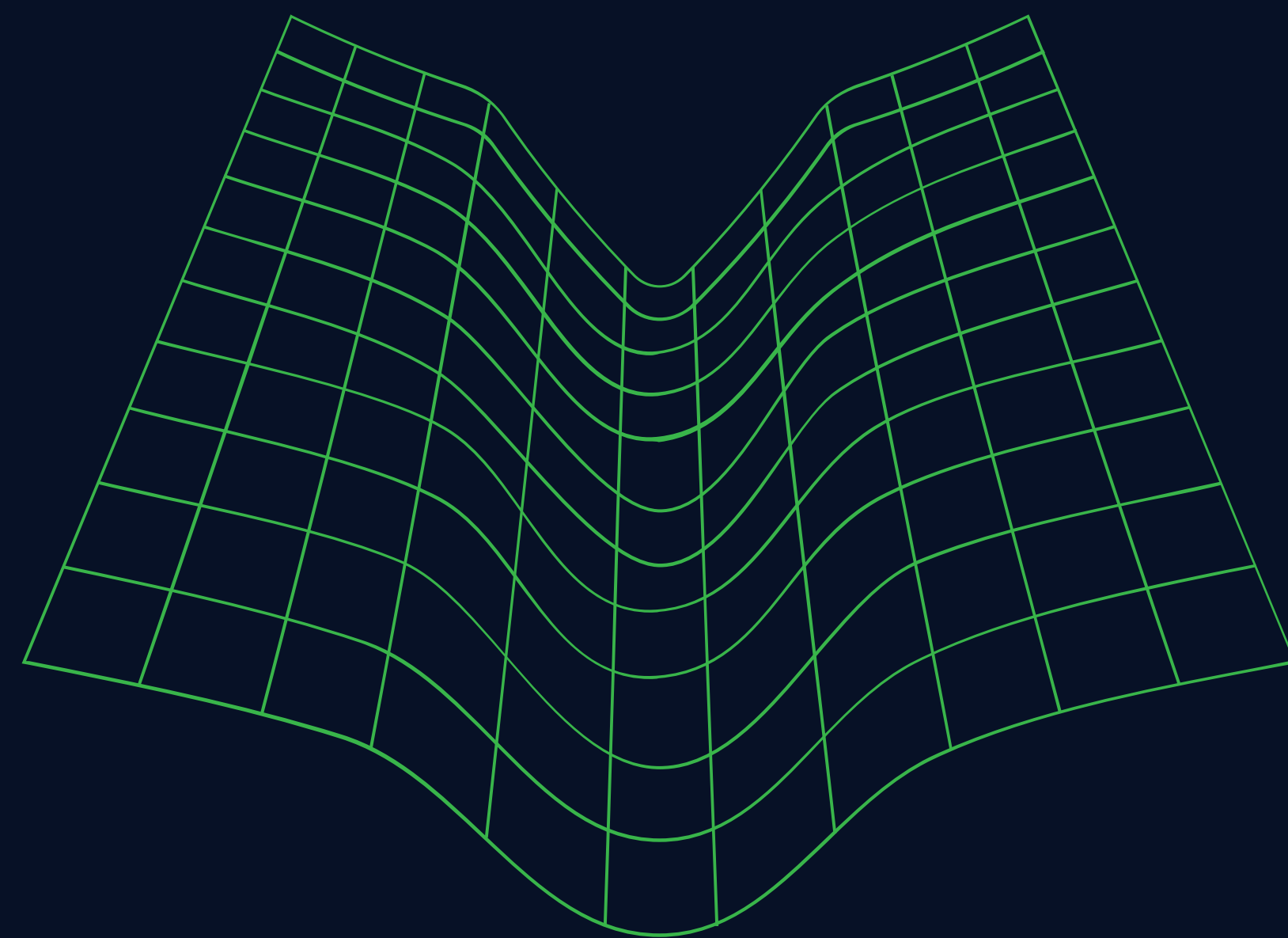
Структурная ловушка +  
капиллярные эффекты



Структурная ловушка +  
капиллярные эффекты +  
растворение



# Выбор подходящей опции моделирования закачки CO<sub>2</sub>



# Задание растворения CO<sub>2</sub> в воде в tНавигатор

Табличное

## SOLUBILI

CO2SOL

Табличное задание растворимости [CO2](#), плотность и вязкости воды. При задании по дефолту можно выбрать корреляцию в параметре TNAVCTRL SOLUBTAB\_DEN

Используется в отсутствие сильных градиентов солености и температуры

## SOLUBILT

Табличное задание с учетом влияния температуры. Нет дефолтного значения

## SOLUBILS

Табличное задание с учетом влияния солености. Нет дефолтного значения

## SOLUAQA

Табличное задание для нескольких растворённых в воде компонент. Нет дефолтного значения. Плотность и вязкость воды задаются через кл. слова **DENAQA, VISCAQA** (возможны дефолтные значения)

GASSOL

По закону Генри

## SOLUHENRY

GASSOL

Зависимость летучести CO<sub>2</sub> и других компонент в воде задается по закону Генри. При задании параметров по дефолту изменить корреляцию по умолчанию можно в ключевом слове HENRYCORR

$$f_{\text{CO}_2}^w = H(p,T) x_{\text{CO}_2}^w$$

По модиф. уравнению состояния. Нет нефти

CO2STORE

Растворение и vaporизация CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O по модифицированному RK

GASWAT

Растворение и vaporизация CO<sub>2</sub>, газов и H<sub>2</sub>O по модифицированному PR

CPA-SRK уравнение состояния SRK с ассоциативным членом



# Опции моделирования CO<sub>2</sub> в тНавигатор

## Нет нефтяной фазы

### CO2STORE

Только CO<sub>2</sub> и солевой раствор.

Для расчета флеша газ-вода используется модиф. для воды уравнение состояния Редлиха-Квонга. **Вода испаряется в газ.**

Правильно рассчитывается плотность воды («защиты» дефолтные DENAQA SOLUAQA). Рассчитывается выпадение солей

### GASWAT

Возможно присутствие CO<sub>2</sub> и других газовых компонент.

Для расчета флеша газ-вода используется модиф. для воды уравнение состояния Пенга-Робинсона. **Вода испаряется в газ.**

Для правильного расчета плотности воды при больших давлениях нужно указать кл. слово **DENAQA**

При использовании уравнения состояния **EOS CPA-SRK** им хорошо описывается не только растворимость, но и плотность и вязкость (с 23.2)

## Есть нефтяная фаза

### CO2SOL

Присутствует нефтяная фаза. Учитывается растворимость в воде только CO<sub>2</sub>. **Вода не испаряется в газ.**  
**SOLUBILI/SOLUBILT/SOLUBILS**

### GASSOL

Присутствует нефтяная фаза. Учитывается растворимость в воде не только CO<sub>2</sub>, но и других компонент. Например, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> etc.

**SOLUHENRY / SOLUAQA+DENAQA+VISCAQA**

**Вода не испаряется в газ.**

**SOLUHENRY** Если задана компонента H<sub>2</sub>O, можно включить 3фазный флеш (**FLASHCTRL OGW\_FLASH**). **В этом случае учитывается и испарение воды.**

# Как выбрать подходящую изотермическую опцию?

Нет нефтяной фазы

## CO2STORE

Только CO<sub>2</sub> и солевой раствор.

Вода испаряется в газ.

Например: закачка CO<sub>2</sub> в водоносный горизонт.

## GASWAT

Возможно присутствие CO<sub>2</sub> и других газовых компонент.

Вода испаряется в газ.

Либо дефолтное EOS PR + DENAQA, либо EOS CPA-SRK (плотность будет верной) (с версии 23.2)

Например: закачка в истощенные газовые пласты. Закачка CO<sub>2</sub> + других газовых компонент (например, N<sub>2</sub>).

Есть нефтяная фаза

## CO2SOL

Учитывается растворимость в воде только CO<sub>2</sub>. Вода не испаряется в газ.

Например: закачка CO<sub>2</sub> в истощенное газо/нефтяное месторождение.

## GASSOL

Учитывается растворимость в воде не только CO<sub>2</sub>, но и других компонент.

По умолчанию вода не испаряется в газ.

Для **SOLUHENRY** можно включить 3фазный флеш. В этом случае учитывается и испарение воды.

Например: закачка CO<sub>2</sub> в истощенное нефтяное или газонефтяное месторождение в присутствии H<sub>2</sub>S

Например: закачка CO<sub>2</sub> в случае, если необходимо учесть испарение воды

# Термическая опция: CO2STORE+THERMAL

Нет дополнительных кл. слов на KVALUES

## CO2STORE

Только CO2 и солевой раствор.

Для расчета флеша газ-вода используется модиф. для воды уравнение состояния Редлиха-Квонга. Правильно рассчитывается плотность воды через дефолтные DENAQA+VISCAQA

Та же модель выпадения солей

Дефолтные Kvalues

Задано KWTABTN

## CO2STORE

CO2 + любые газы, нефть и солевой раствор

Явно задается **KWTABTN** (для воды) - таблицы от температуры и давления

Можно задать любой состав нефть вода газ. **3фазный термический флеш**

В случае нефти дополнительно задается **KVTABTN**

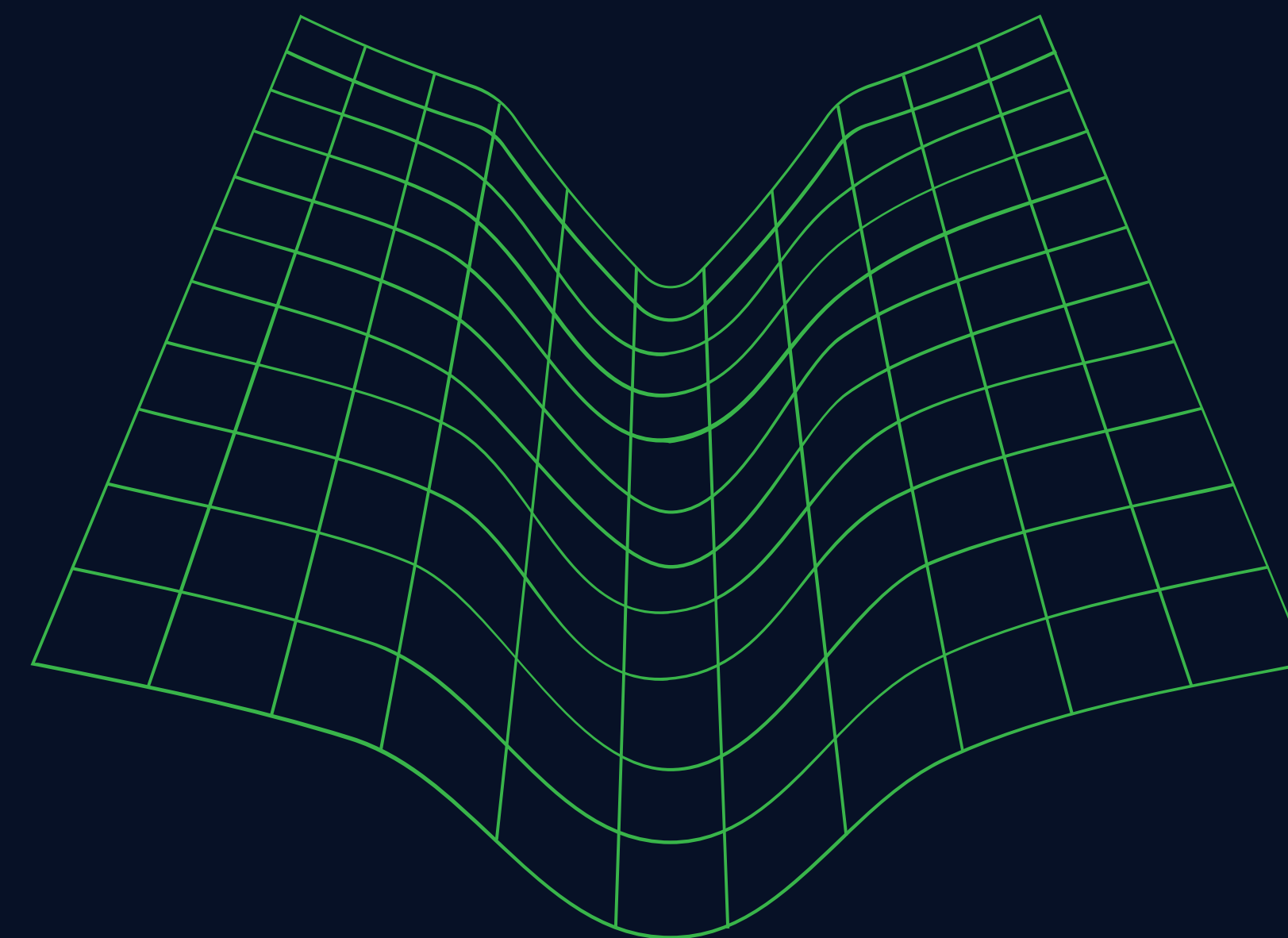
**OILVISCT, GASVISCT, WATVISCT**

**DENAQA VISCAQA**

**DREF etc**



# ЕОР с закачкой CO<sub>2</sub>



# Методы воздействия на пласт

## Первичные методы

Естественный режим

Искусственный лифт

## Вторичные методы

Поддержание пластового давления

Заводнение

Уплотняющее бурение

## Третичные методы

Термические

Газовые

Физико-химические

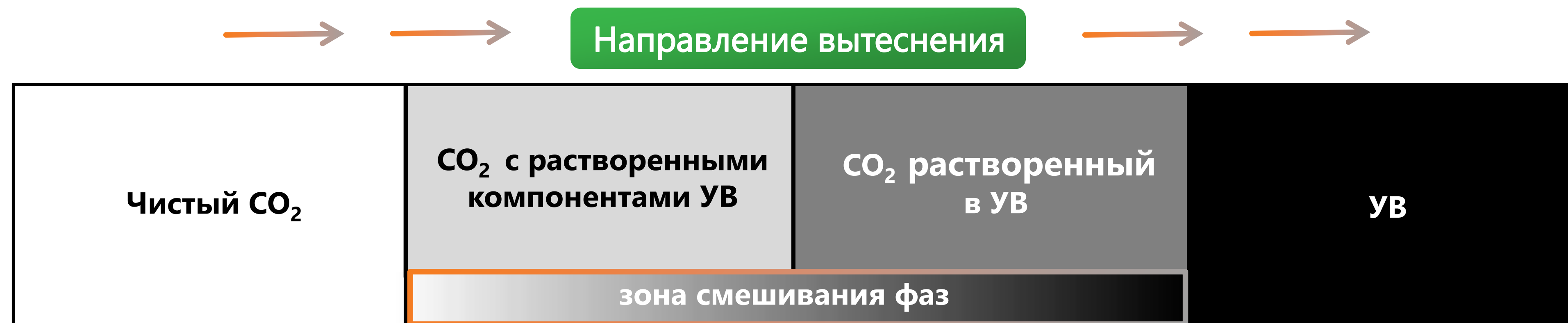
Гидродинамические

Другие

- Закачка CO<sub>2</sub>
- Закачка кислорода
- Закачка азота

# Закачка CO<sub>2</sub>

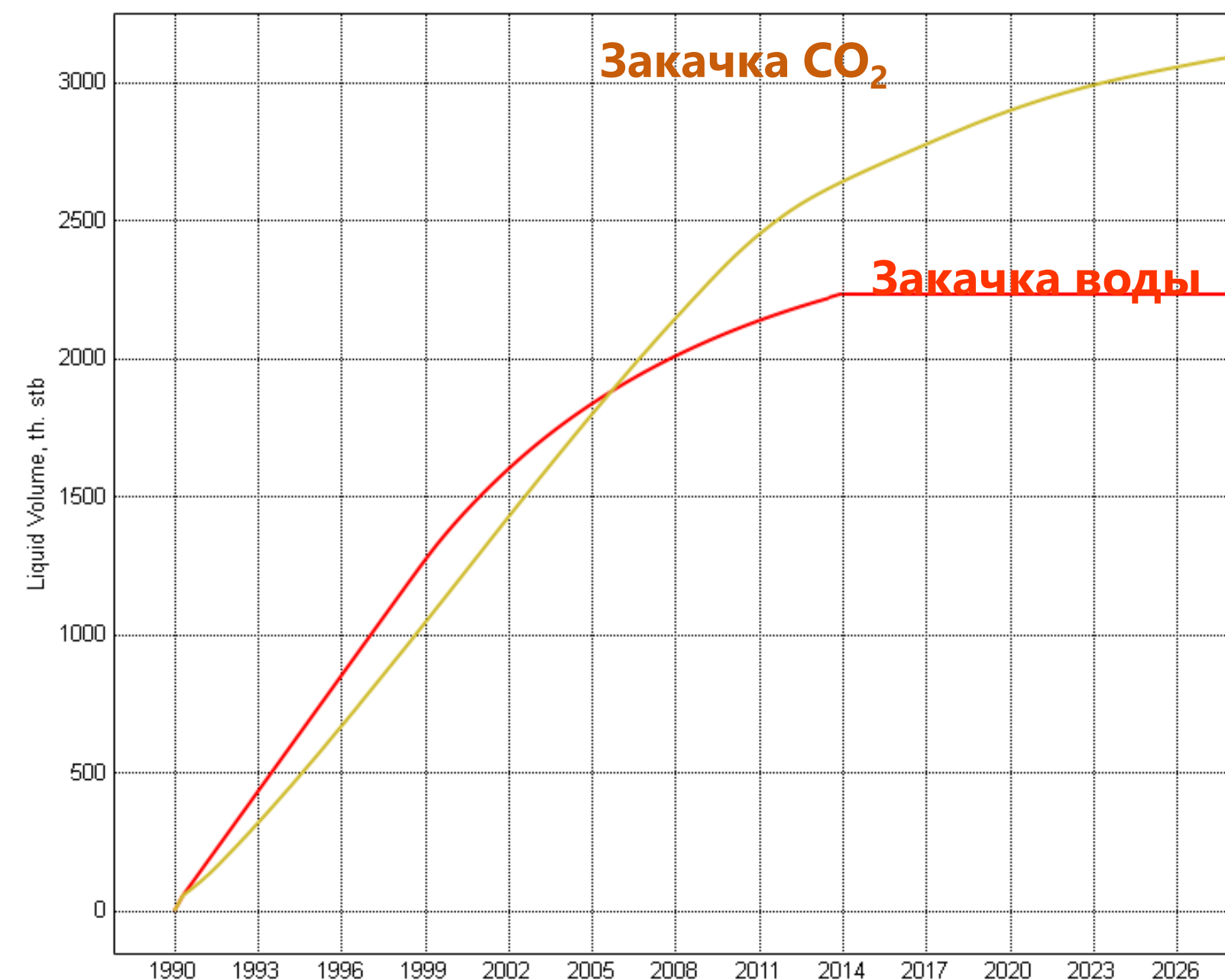
- Несмешивающаяся вытеснение: закачанная фаза и УВ в пласте не образуют гомогенную среду при контакте.
- Смешивающееся вытеснение: две фазы формируют гомогенную смесь при контакте.
- Существует ряд газов, которые приводят к смешиванию фаз. Например: C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> УВ, CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>.



# Закачка CO<sub>2</sub>

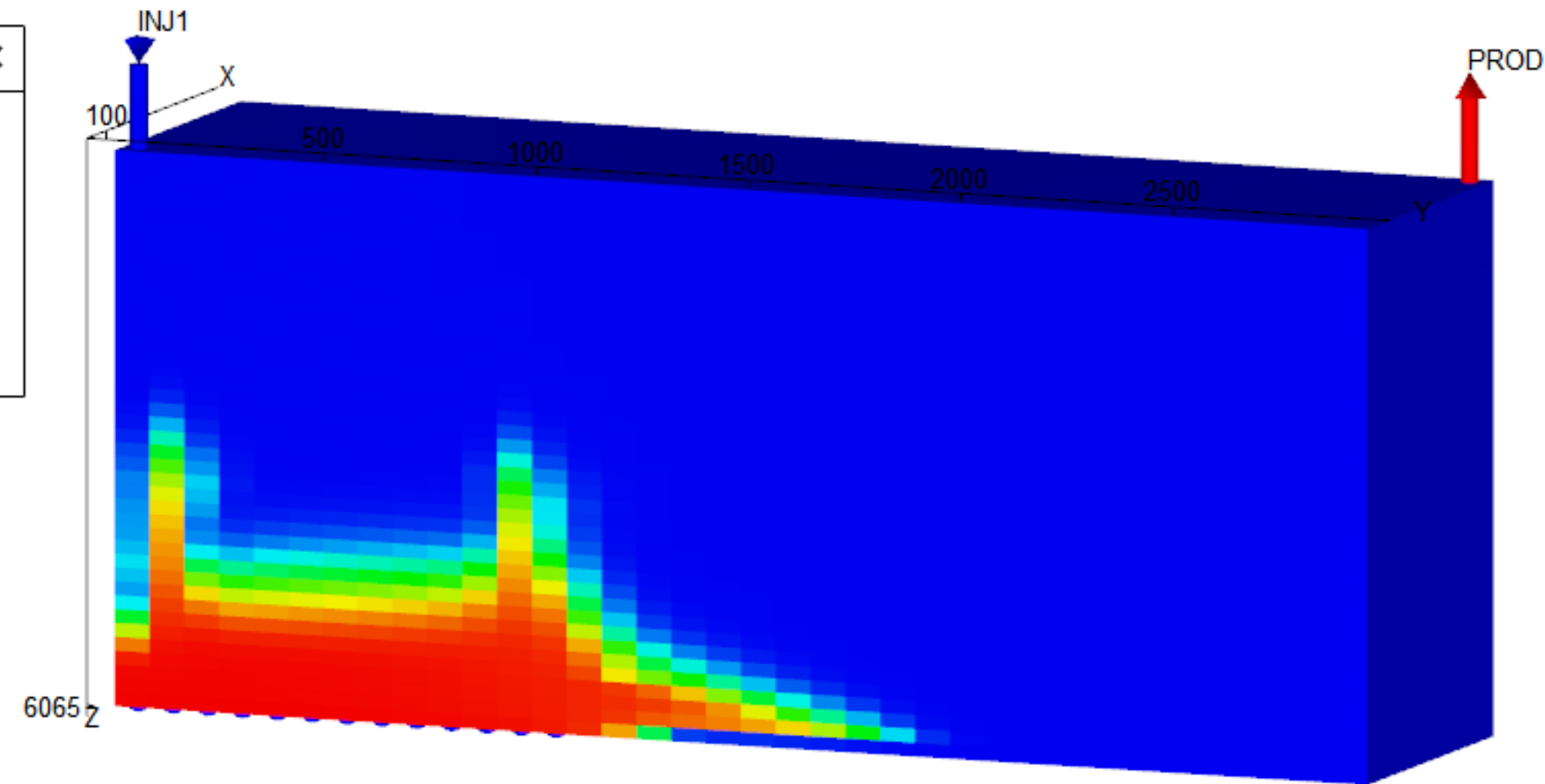
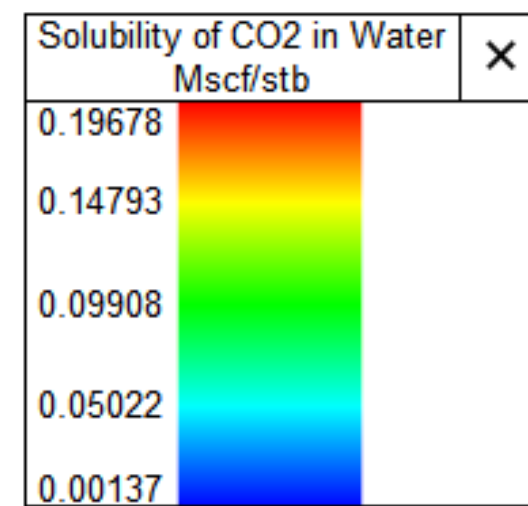
- Закачка CO<sub>2</sub> приводит к увеличению нефтеотдачи за счет смешивания фазы газа с нефтью и уменьшения остаточной S<sub>o</sub>
- Дополнительно можно использовать масштабирование конечных точек ОФП в зависимости от состава

Накопленная Нефть



# Закачка CO<sub>2</sub>

- По умолчанию считается, что CO<sub>2</sub> находится в равновесии между 3 фазами (вода, нефть и газ)

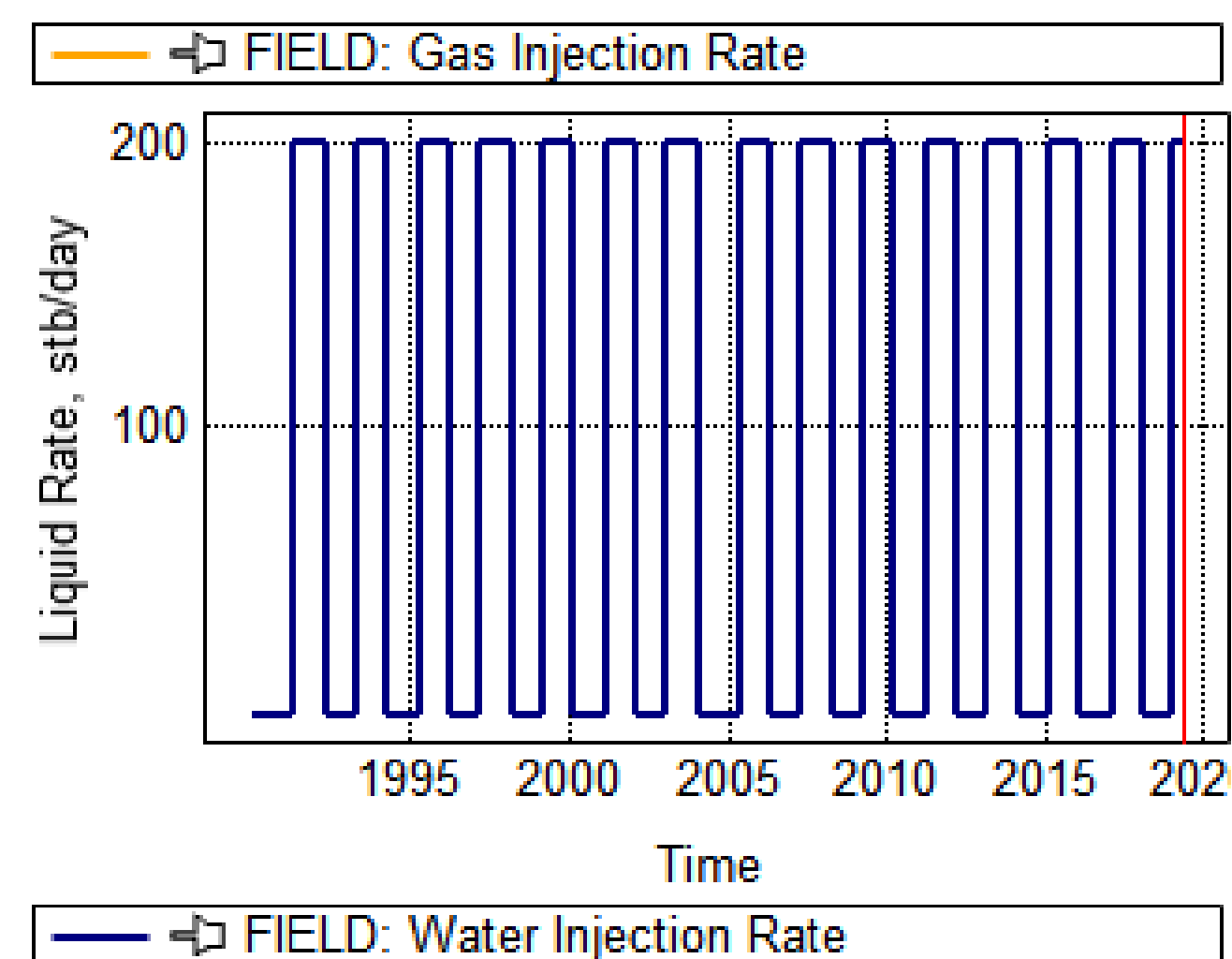
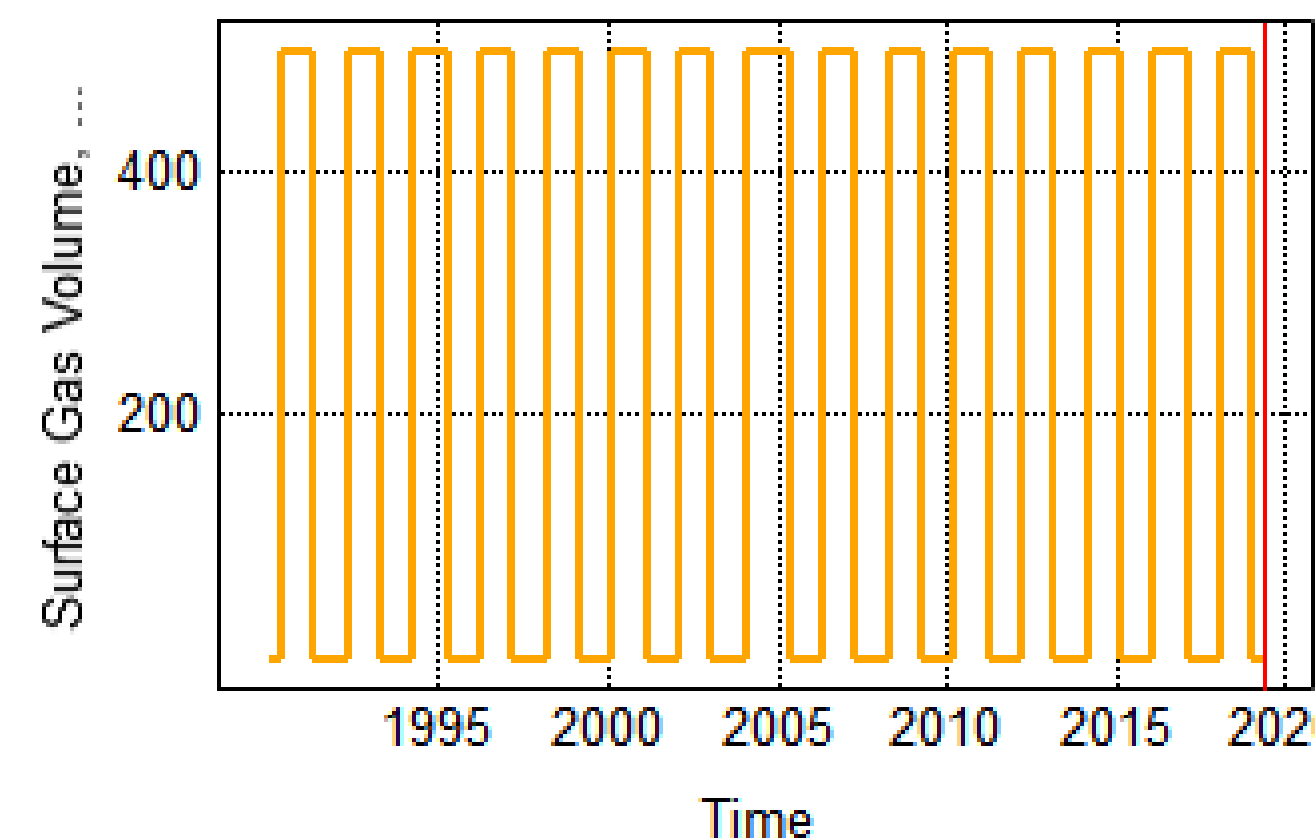
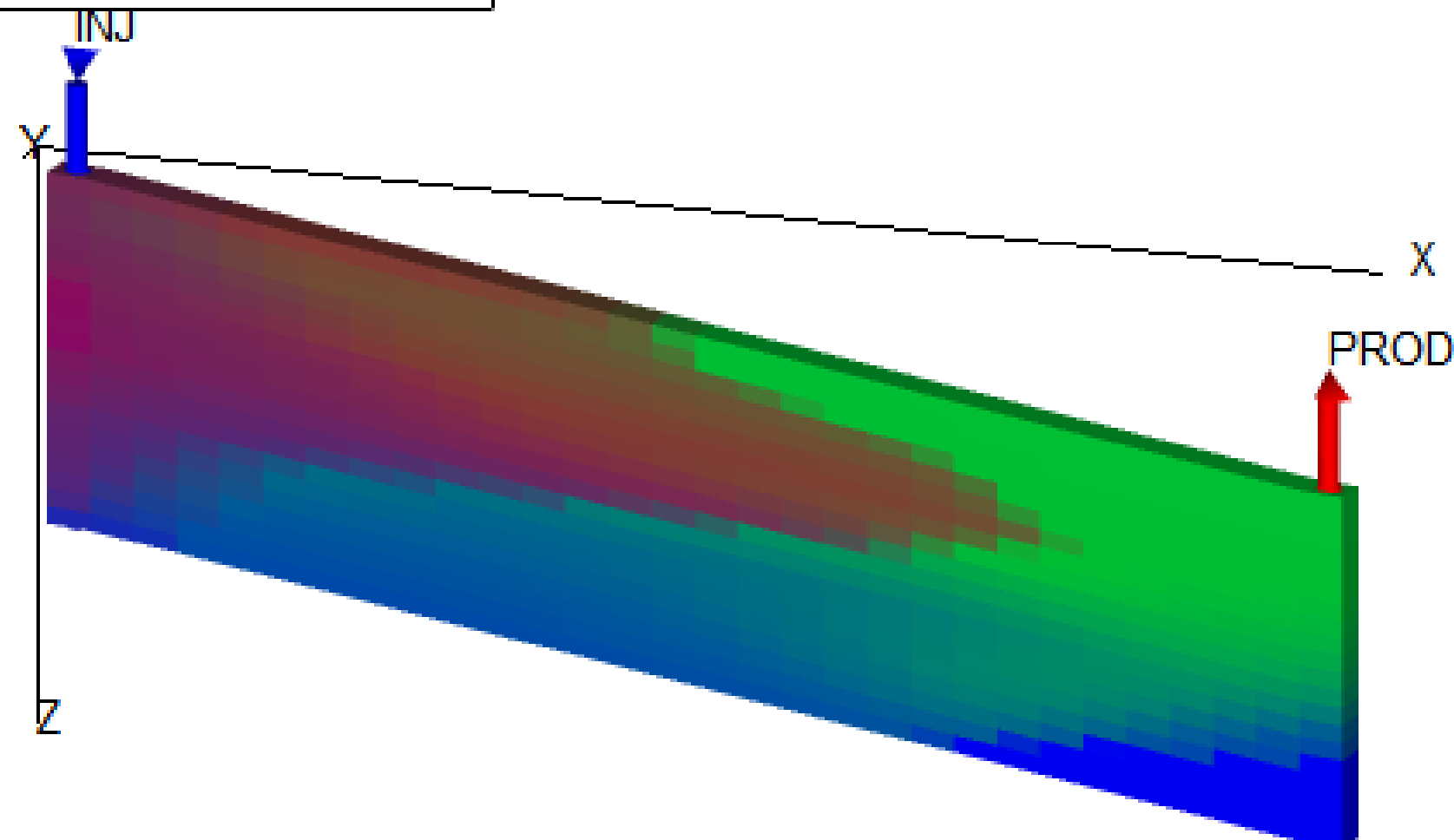
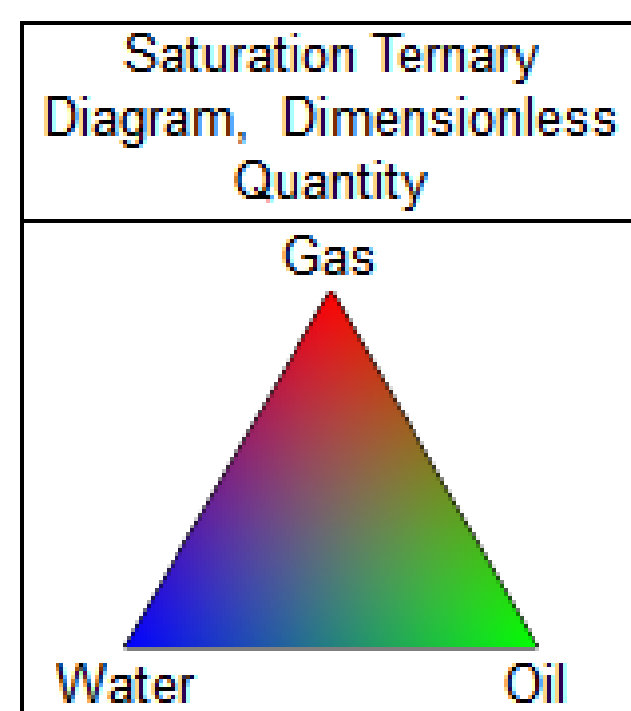


- Опционально, можно считать, что CO<sub>2</sub> растворяется только в фазе нефть. Такой подход ускоряет расчет
- Иногда закачка CO<sub>2</sub> сопровождается закачкой воды для поддержания пластового давления. В данном случае, технология называется WAG
- Существуют 2 основные технологии WAG: циклическая закачка воды и газа (WAG) и закачка смеси вода-газ (SWAG) (см. далее)



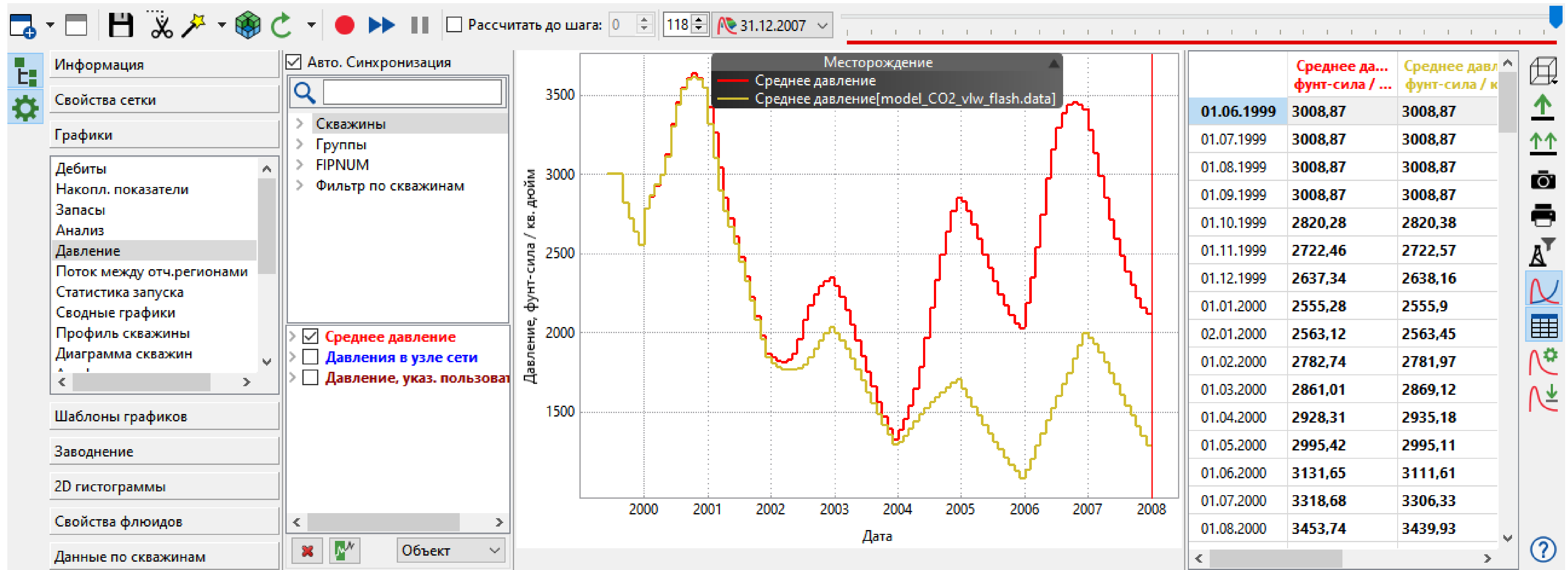
# WAG: пример

- Пример циклической закачки воды и газа: используется для увеличения коэффициента вытеснения, при заводнении смешивающимися фазами. Газ увеличивает подвижность нефти, а нагнетаемая за ним более вязкая вода эффективно вытесняет подвижную нефть.



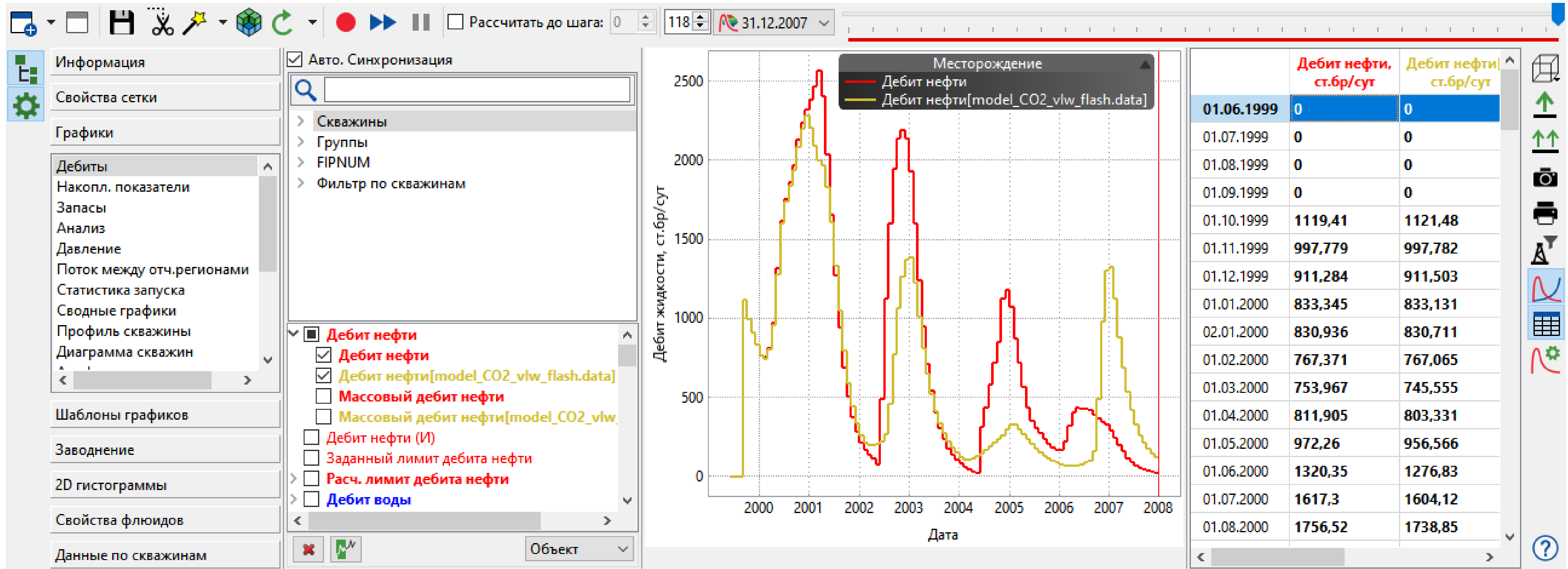
# Сравнение: Среднее давление

Видно влияние растворимости углекислого газа CO<sub>2</sub> на среднее давление в модели: если растворимость CO<sub>2</sub> не учитывается, то пластовое давление и соответственно добыча нефти завышаются



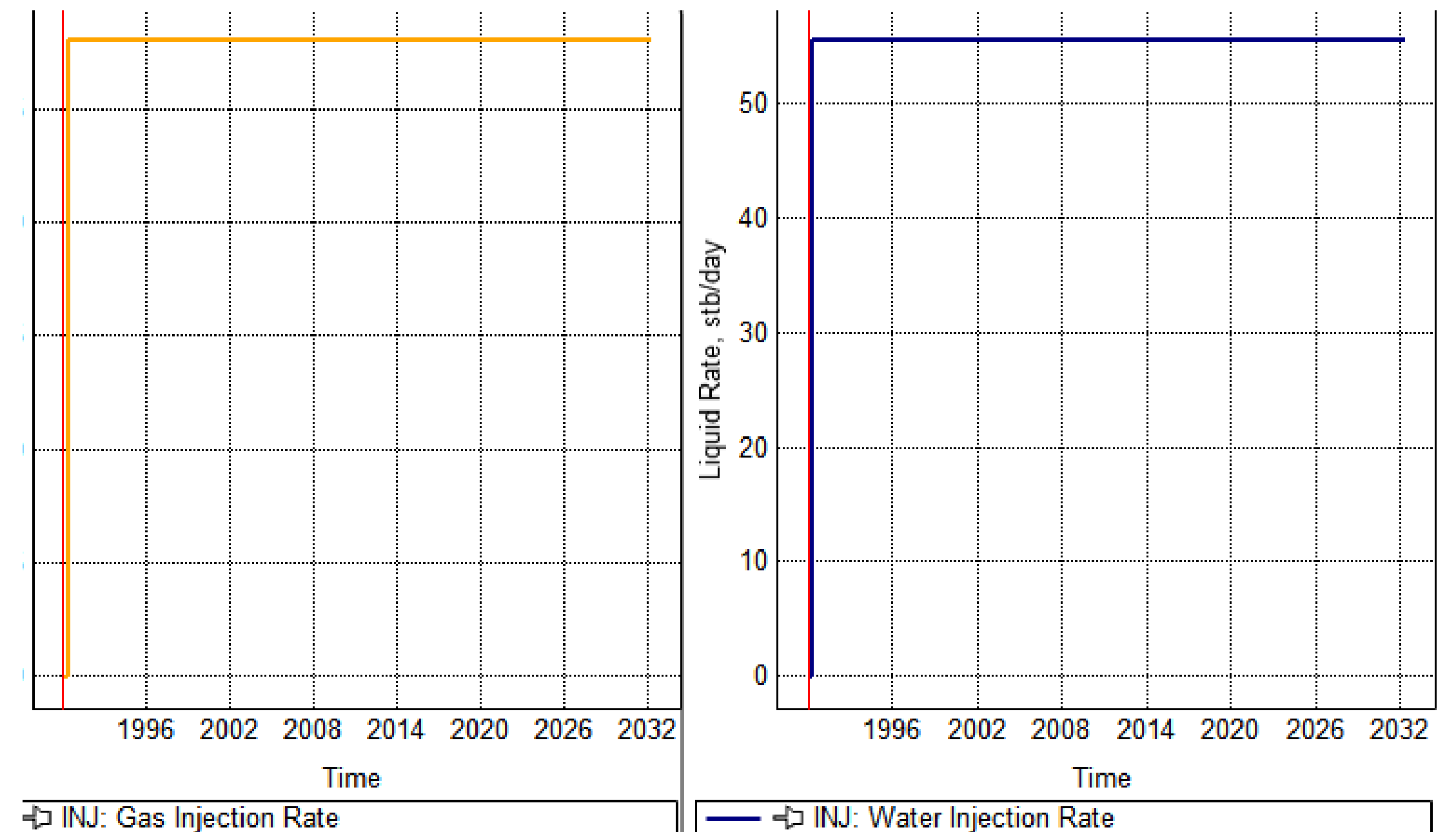
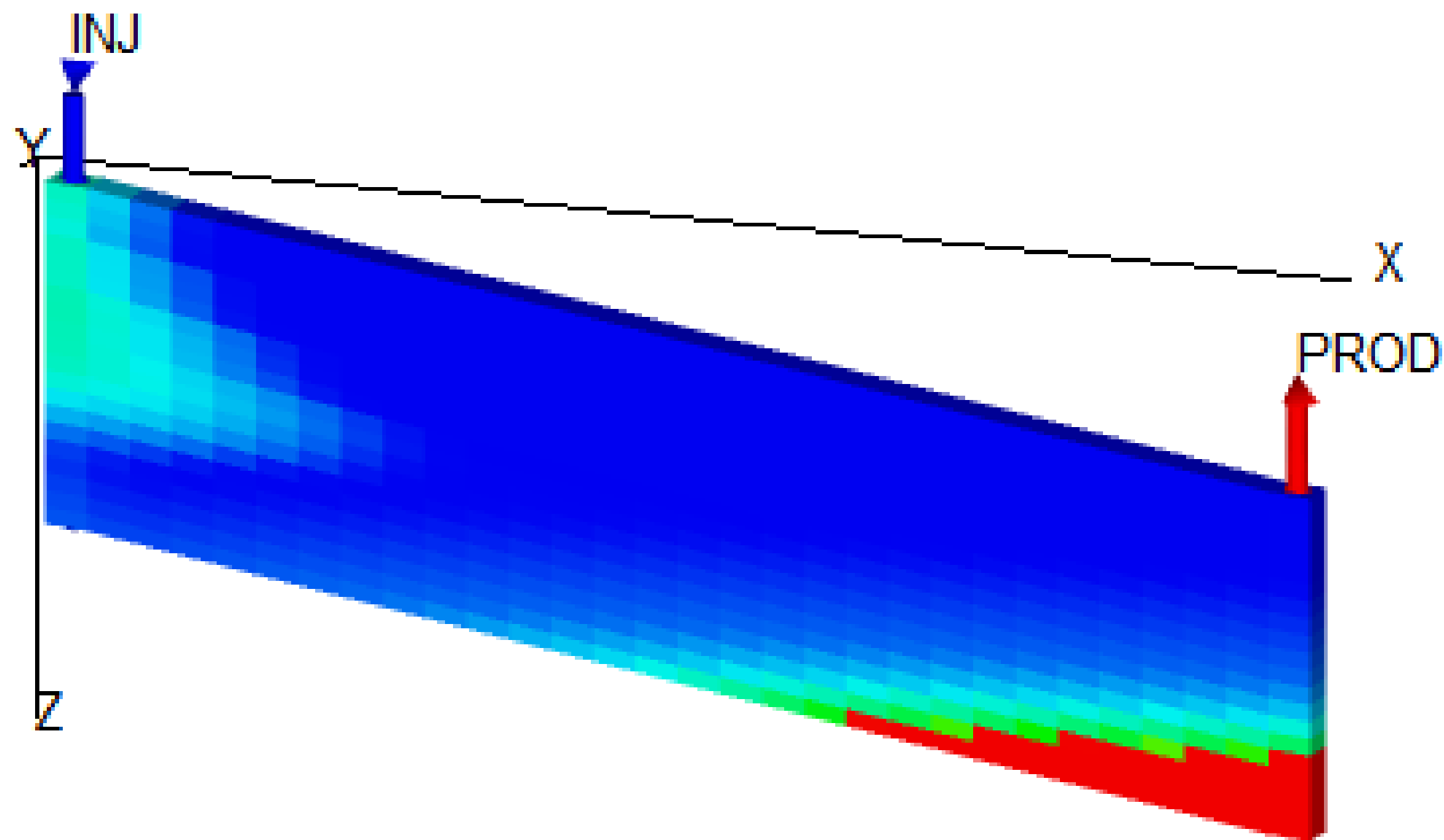
# Сравнение: Дебит нефти

Видно влияние растворимости углекислого газа CO<sub>2</sub> на дебит нефти

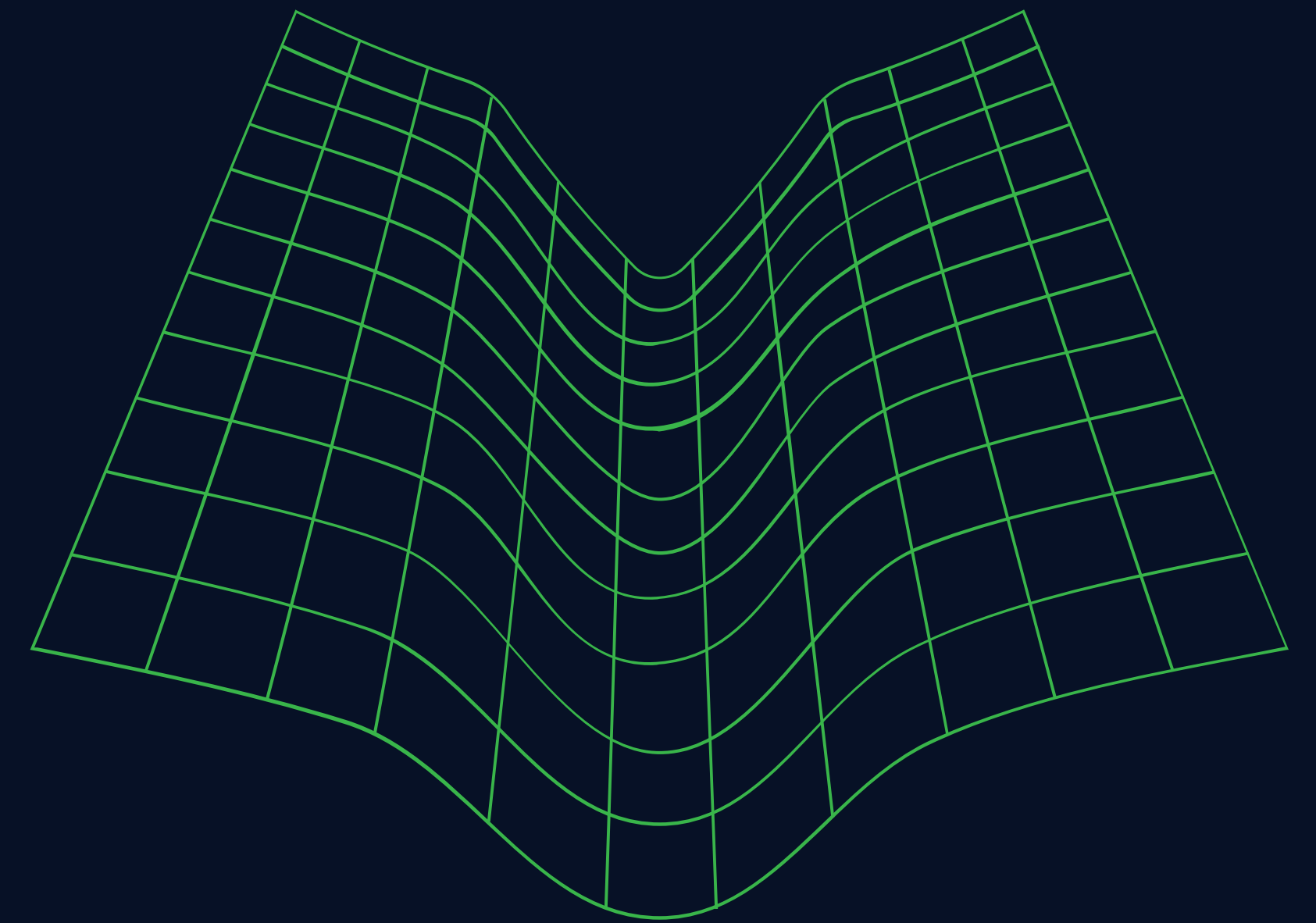


# SWAG: одновременная закачка воды и газа

- Одновременная закачка смеси вода-газ называется **SWAG**. Вода и газ смешиваются на поверхности или закачиваются отдельно (например, газ в нижние слои, а вода в верхние)



# Пример использования языка Python: поддержание указанной доли CO2

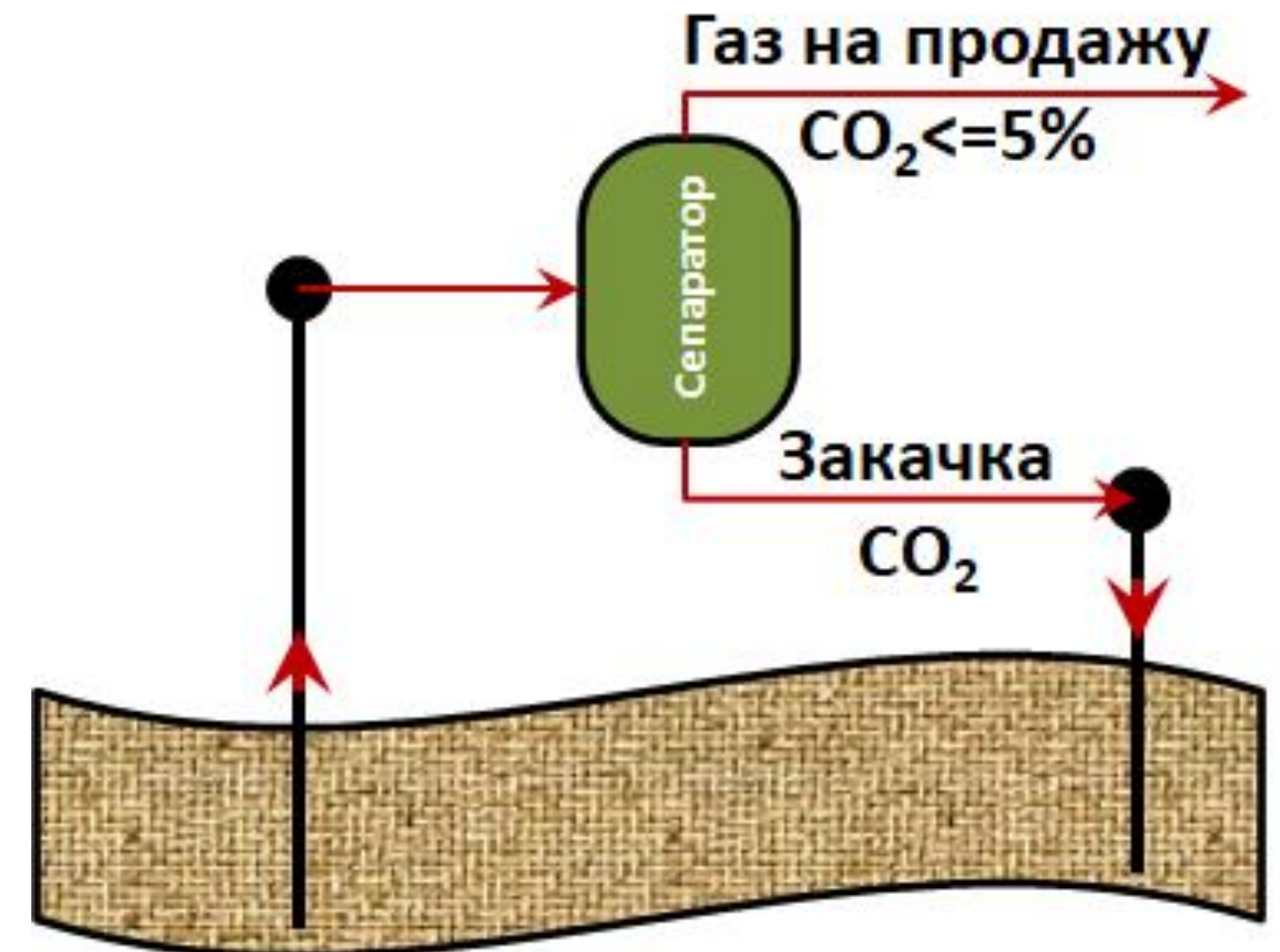


# Пример: поддержка указанной доли CO<sub>2</sub>

Пласт содержит высокий процент CO<sub>2</sub>. Продаваемый газ должен содержать не более 5% CO<sub>2</sub>. Избыток CO<sub>2</sub> сепарируется и закачивается обратно в пласт.

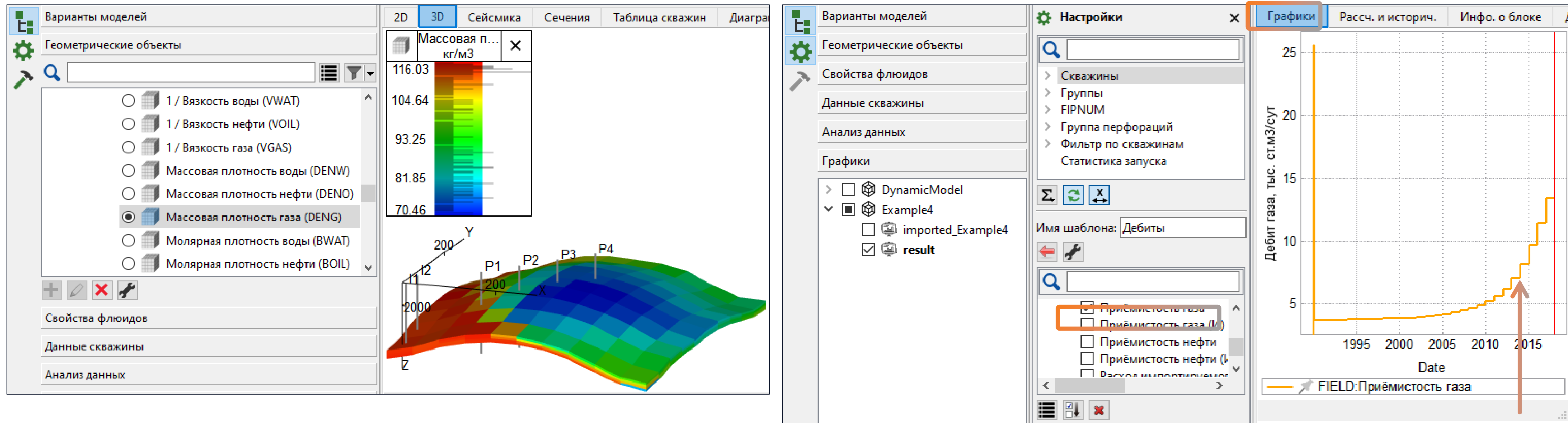
Скрипт работает следующим образом:

- Проверяет, является ли шаг отчетным (is\_report\_step). Если нет, то ничего не делает
- Вычисляет долю CO<sub>2</sub> в добытом газе (fcmpr\_2/fmpr) и сравнивает ее с пороговой величиной (5%)
- Если доля CO<sub>2</sub> больше, чем пороговое значение, вычисляется количество CO<sub>2</sub>, которое необходимо удалить из добытого газа (co2\_to\_inject)
- Вычисляет долю CO<sub>2</sub> на продажу (co2\_sale\_frac)
- Передает последнее значение в модель как аргумент ключевого слова GRUPSALE (add\_keyword)

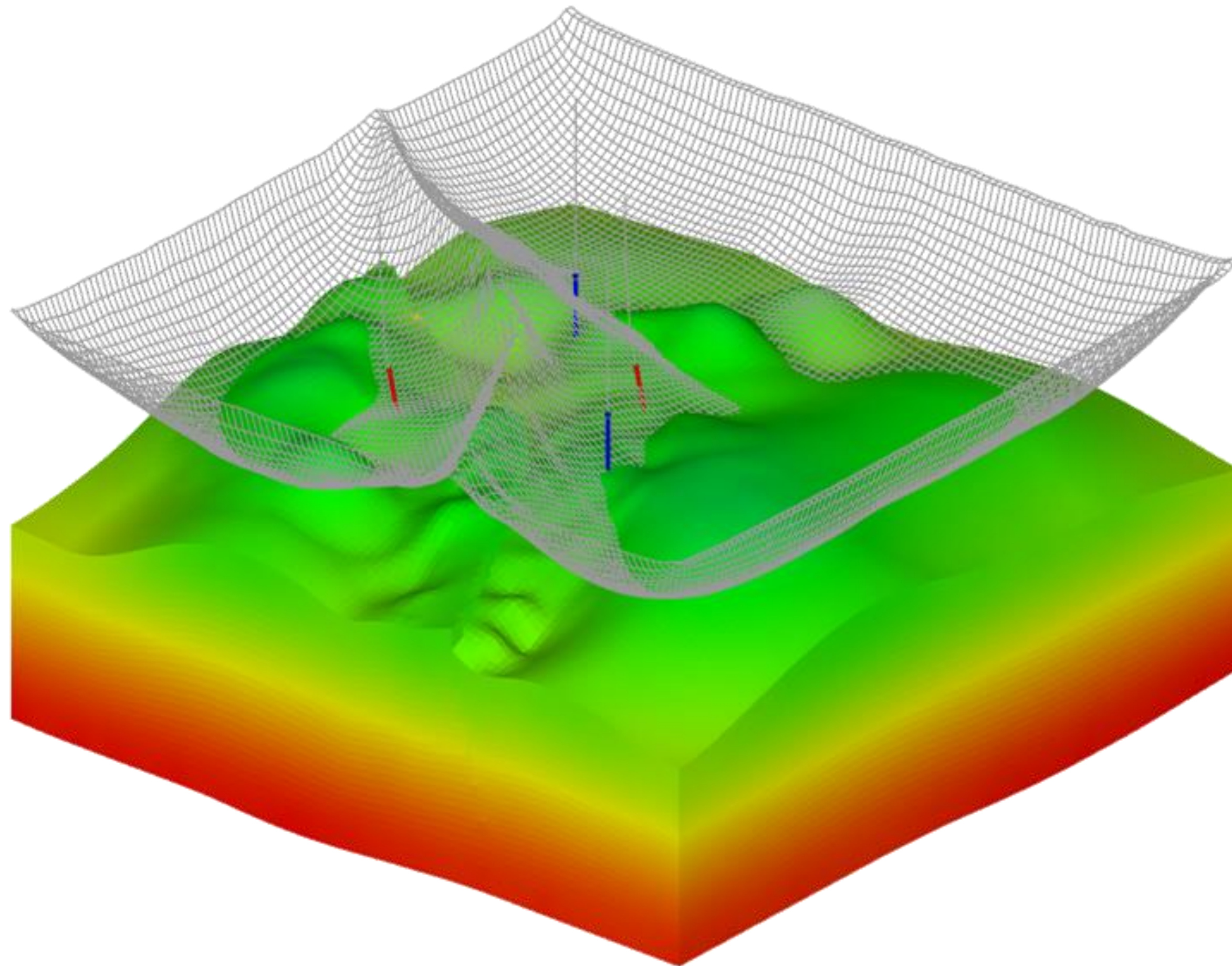


# Пример: поддержка указанной доли CO<sub>2</sub>

С распространением закачанного CO<sub>2</sub>, растёт его доля в добытом газе, а следовательно, и обратная закачка.



# Дополнительные опции: геомеханика



Целостность породы, напряженное околоскважинного пространства, деформация и оседание кровли, образование трещин - все это может повлиять на способность пласта удерживать  $\text{CO}_2$ .

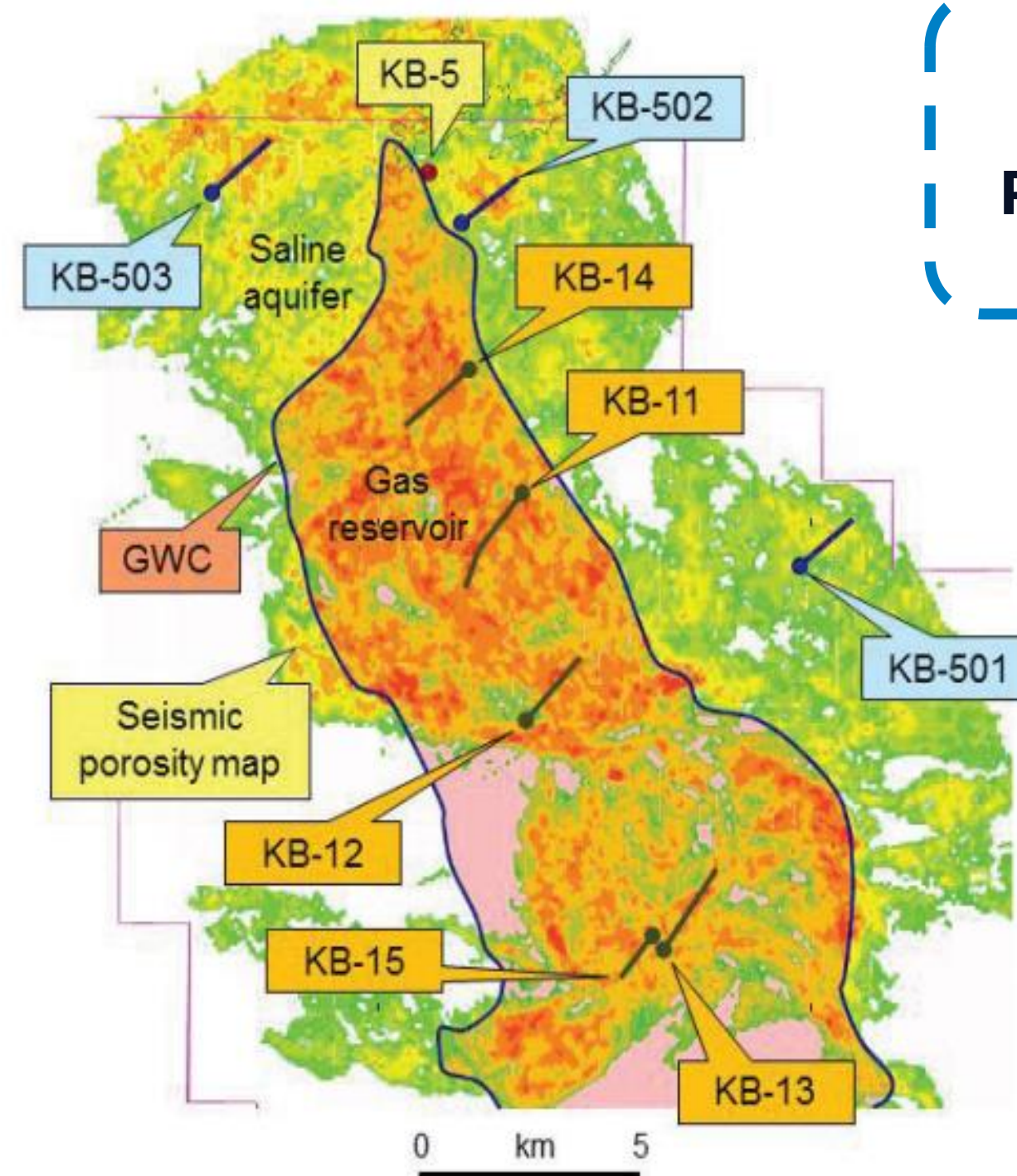
В **tНавигатор** реализована геомеханическая опция которая позволяет моделировать разрушение породы, образование трещин в пласте, деформацию кровли и оседание.

Помогает определить оптимальные режимы закачки, чтобы не допустить разрушения породы и образования трещин.



# Пример: проект улавливания и хранения углерода Ин-Салах

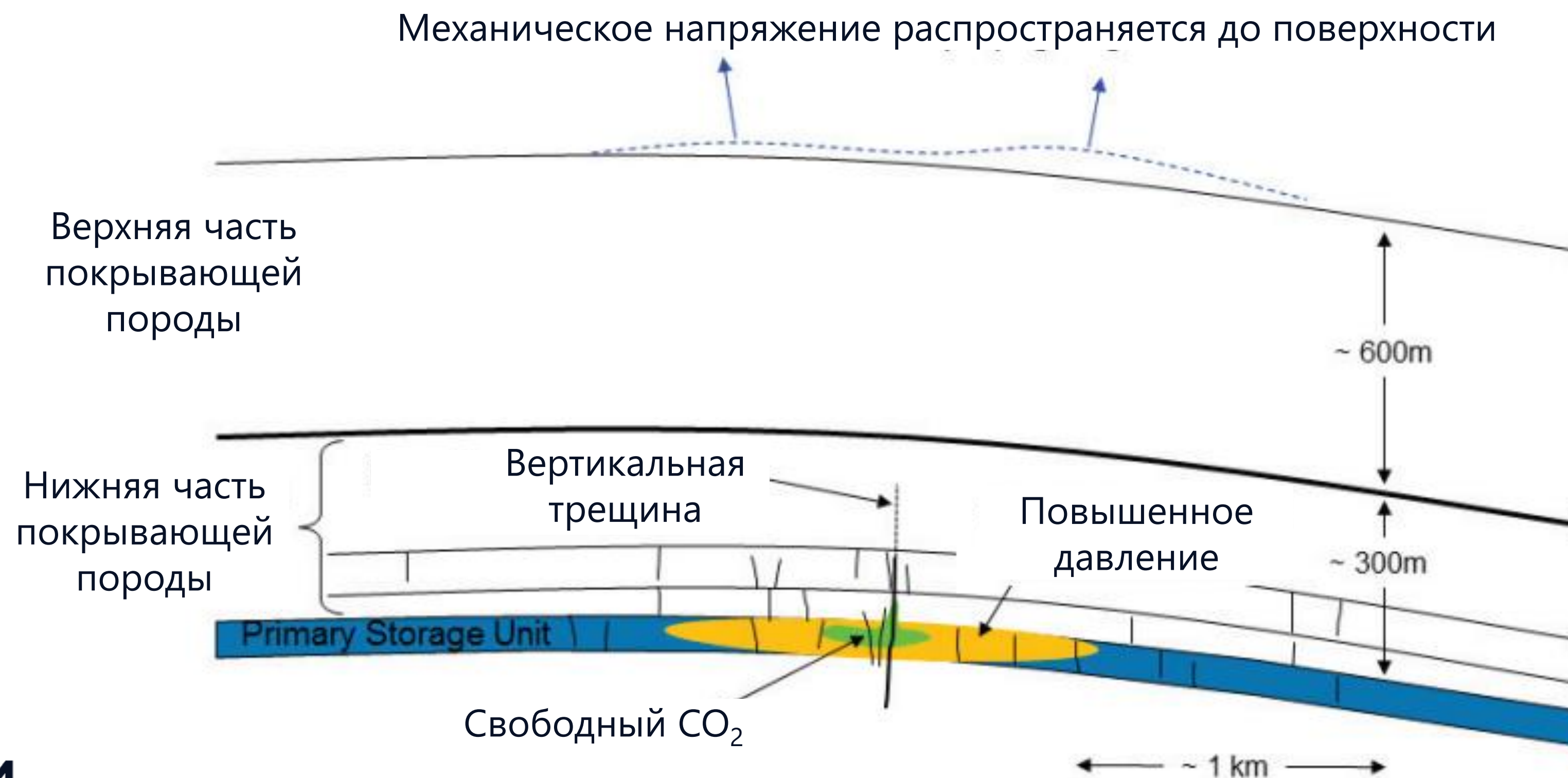
- Проект захоронения углерода Ин-Салах в центральном Алжире – один из первых в мире наземных проектов такого рода. CO<sub>2</sub> с нескольких газовых месторождений, содержащих его в концентрации 1-10%, отделяется от добытого газа (спецификация требует < 0.3% CO<sub>2</sub>) и закачивается на глубину в песчаники каменноугольного периода на месторождении Кречба.
- Закачка началась в 2004 г. К 2013 г. закачано около 3.8 млн. тонн CO<sub>2</sub>.
- Количественный анализ рисков, проведённый в 2010 г., на основании сейсмических и спутниковых данных, а также геомеханического моделирования, выявил основной риск, связанный с потенциальными утечками вверх в покрывающую породу.



Ссылка: The In Salah CO<sub>2</sub> storage project: lessons learned and knowledge transfer  
PS Ringrose, AS Mathieson, IW Wright, F Selama, O Hansen, R Bissell,  
Energy Procedia 37, 6226-6236

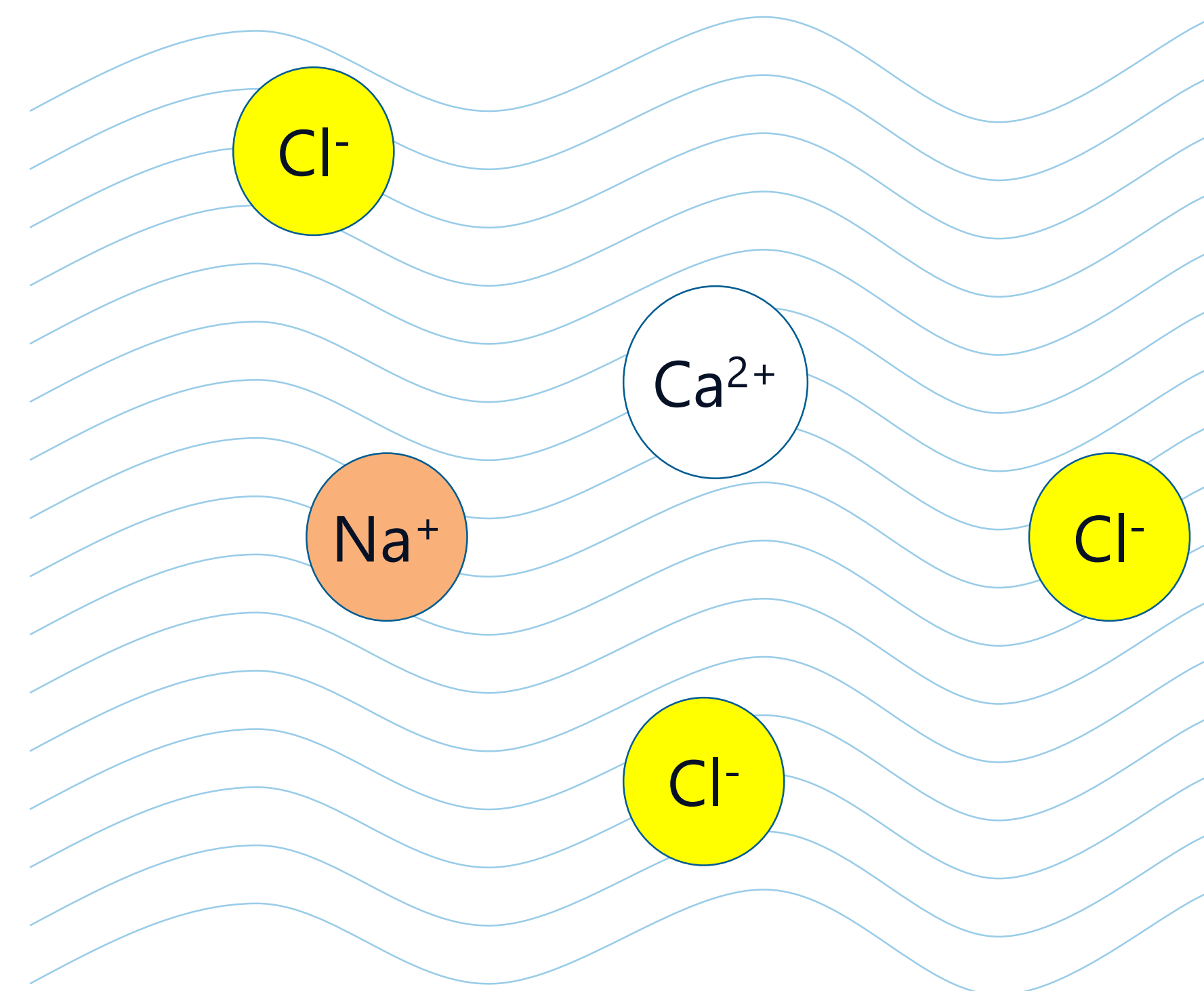
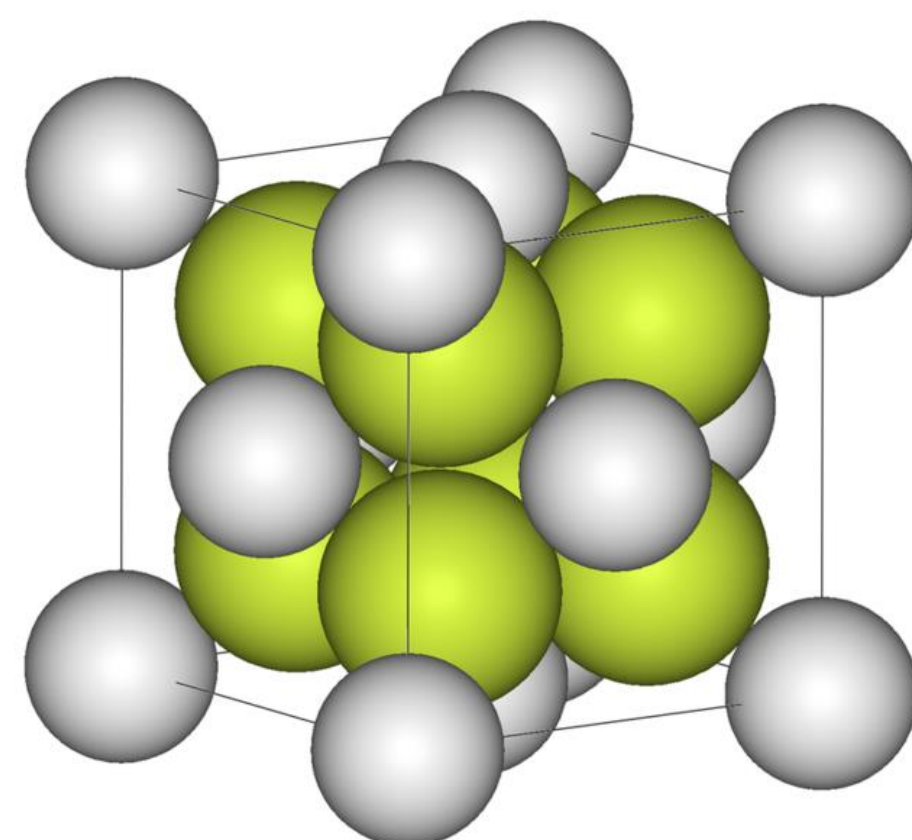
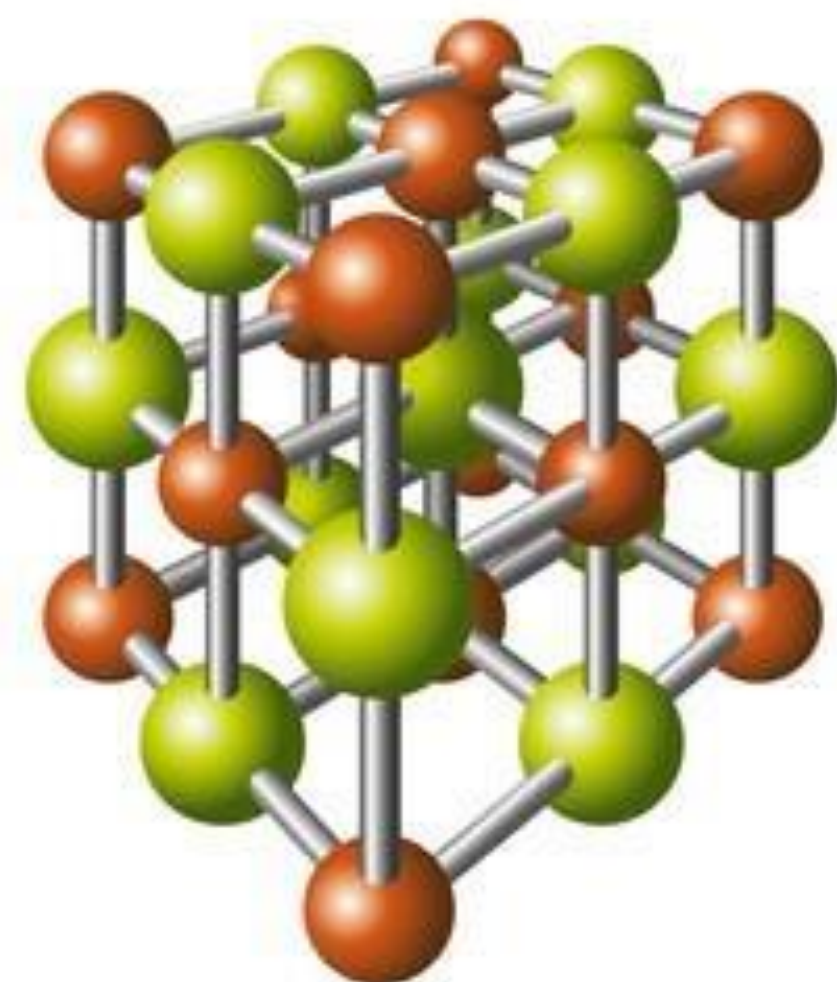
# Проект улавливания и хранения углерода Ин-Салах

- Внимание было сосредоточено на процессе закачки в районе скважины KB-502, где разлом или зона трещины является основным каналом тока  $\text{CO}_2$  и фокальной точкой разрушения породы (как в режиме растяжения, так и сдвига).
- Приведённый рисунок иллюстрирует схему основных процессов. Хотя они ещё не полностью понятны, интеграция всех доступных данных позволяет оценить механический отклик породы на процесс закачки  $\text{CO}_2$ .
- Установлено, что закачка  $\text{CO}_2$  стимулировала развитие естественных трещин в этом районе и могла ввести новые. Хотя эти трещины проникают в нижнюю часть покрывающей породы (см. рис.), их дальнейшее развитие маловероятно.



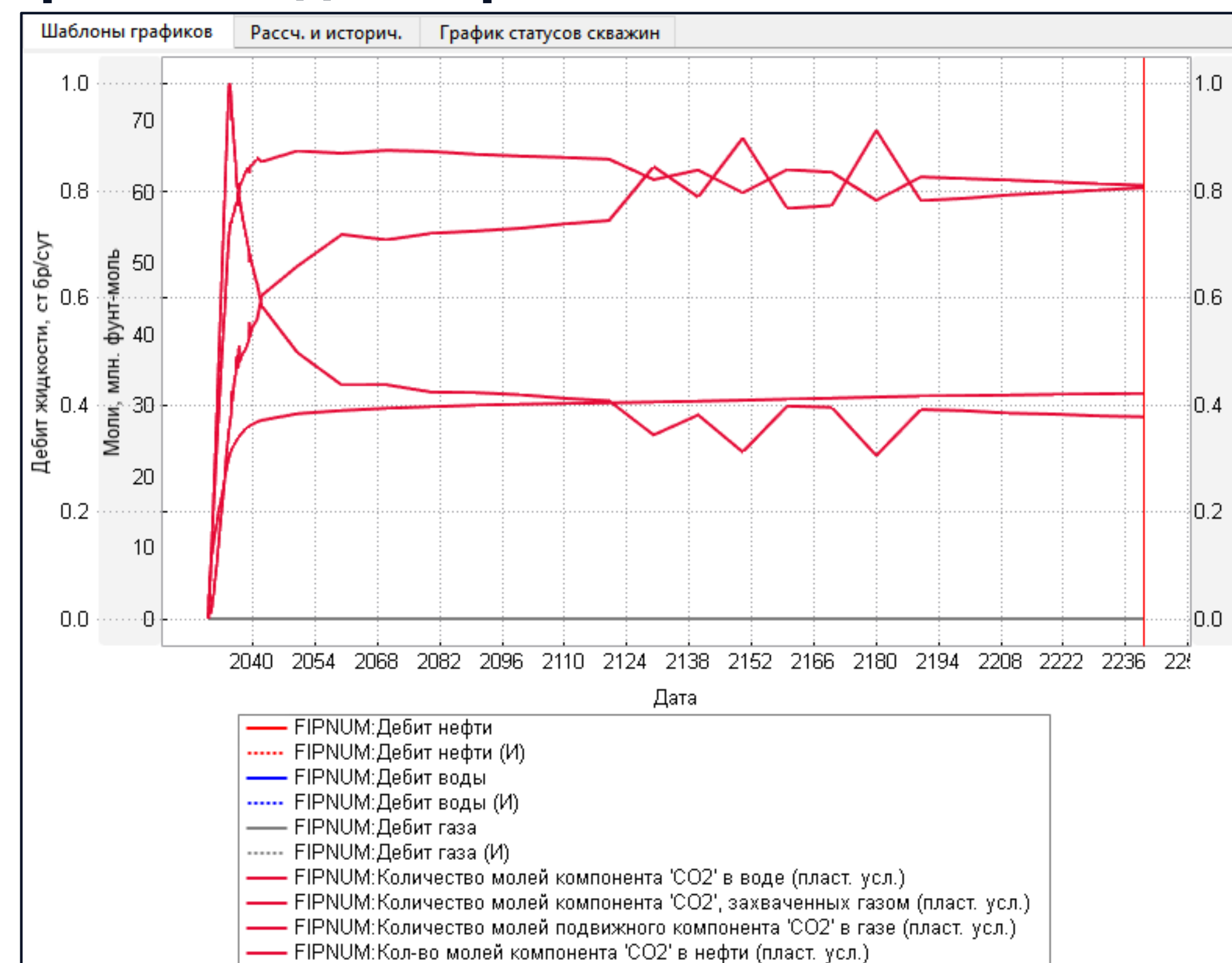
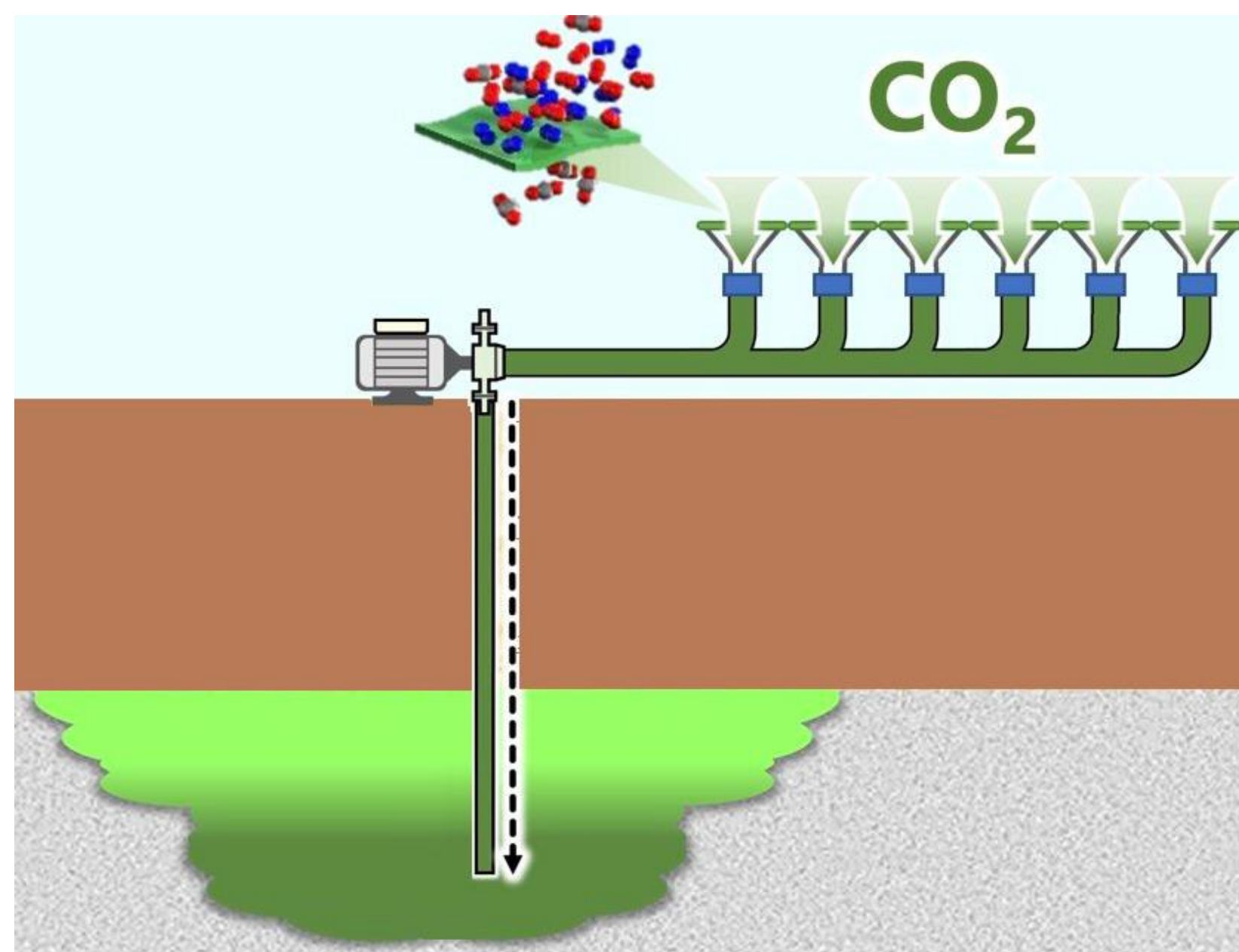
# Дополнительные опции: соли в опции CO2STORE

- Для композиционных моделей формата E3 с опцией моделирования системы  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  в присутствии солей (ключевое слово **CO2STORE**) поддержано моделирование твердой фазы (выпадение и растворение солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{CaCO}_3$ ).

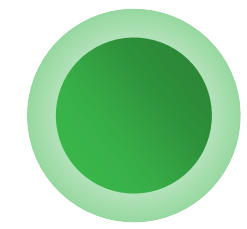


# Визуализация при моделировании хранения CO<sub>2</sub>

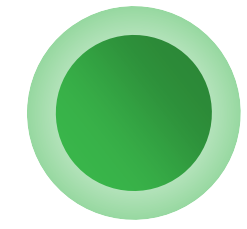
- Для композиционных моделей с опцией расчета количества CO<sub>2</sub>, хранящегося в различных формах в пласте, поддержан расчет объема CO<sub>2</sub> в газообразном состоянии (**plume volume**). Также поддержано использование данной опции в моделях с опцией **CO2STORE**
- Для термических моделей с опцией хранения CO<sub>2</sub> поддержан учет компонентов, которые одновременно могут присутствовать в трех фазах: воде, нефти и газе.



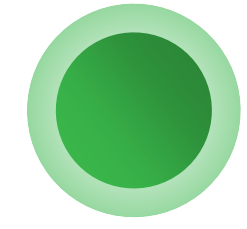
# Дополнительная информация: учебные курсы



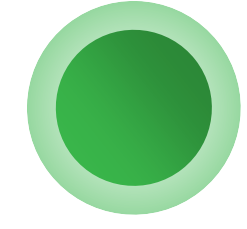
**SIM 5.1 Использование опций CO2**



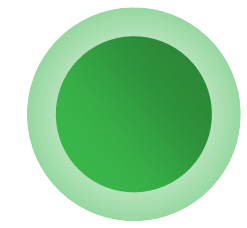
**SIM 5.2 Моделирование закачки CO2 в водоносный пласт**



**SIM 5.3 Моделирование растворения CO2 в водной фазе**



**SIM 7.8 Секвестрация CO2**



**COMMON1.6 Использование языка Python в Schedule**

Эксперт tНавигатор [v23.2-1688-g8b4b0066a645]

Глобальный поиск  
CO2

Расширенные настройки  
 Точное совпадение  
Искать в:  
 Текст  
 Заголовки

Результаты поиска в Мануалах и Руководствах: 10 соответствует

Техническое руководство по Симулятору

- 2.16.3.2. Учёт летучести CO2
- 3.4.1. Опция хранения CO2
- 4.8.1. Опция хранения CO2
- 14.2.7. INVENTORY-CO2
- 14.5.12. HENRY-CORR-CO2 / N2 / H2S / C1
- 14.6.78. CO2-AQU-FACT
- 14.6.79. CO2-MNR-FACT

Руководство пользователя по Симулятору  
Руководство по Дизайнеру Сетей  
Руководство по Дизайнеру Скважин

Результаты поиска в учебных курсах: 4 соответствует

- SIM5.1 Использование опций CO2
- SIM5.2 Моделирование закачки CO2 в водоносный пласт
- SIM5.3 Моделирование растворения CO2 в водной фазе
- SIM7.8 Секвестрация CO2

Секвестрация CO<sub>2</sub>

Тренинги 2022

РДД

Внимание! При прохождении данного курса следует помнить, что методики, описанные в рамках урока, носят рекомендательный характер и не являются единственно верными. Основной целью данного курса является рассмотрение всех основных функций, доступных в tНавигатор. В реальных проектах применяемые методики могут отличаться от описанных в данном курсе. Все данные, используемые в курсе, не являются реальными.

ТНАВИГАТОР

www.rfdyn.ru  
tnavigator@rfdyn.ru

**Технические руководства,  
tНавигатор Эксперт**

# Выводы

- Актуальность вопроса утилизации углекислого газа путем закачки в пласт высока по всему миру. Помимо захоронения, углекислый газ может использоваться для закачки в нефтяные пласты с целью повышения нефтеотдачи
- В **тНавигатор** поддерживаются такие опции моделирования растворимости **CO<sub>2</sub>**, как GASWAT, CO2SOL, CO2STORE, GASSOL, SOLUHENRY, трехфазный флеш, выпадение твёрдой фазы.
- Поддержана термическая опция для CO2STORE, позволяющая моделировать трехфазный термический флеш с выпадением солей.
- Поддержка гистерезиса, масштабирования ОФП, WAG, SWAG, геомеханики, обширная поддержка Python скриптов, возможности редактирования в **Дизайнере Моделей**, исследования чувствительностей и анализа неопределённости в модуле **Адаптации и Оптимизации**, а также широкие возможности визуализации делают **тНавигатор** незаменимым инструментом при моделировании закачки CO<sub>2</sub> и всех связанных с ней процессов.

