



Институт геоэкологии  
им. Е.М. Сергеева РАН  
Санкт-Петербургское отделение



# Гидрогеологические исследования в связи с обоснованием безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях

В.Г. Румынин, А.М. Никуленков

Москва, РАН  
6 февраля 2025 г.



Санкт-Петербургское отделение  
Института геоэкологии РАН  
им. Е.М. Сергеева

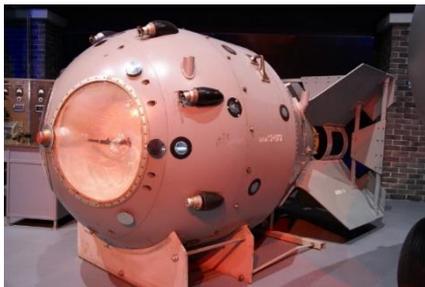
## СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

- Введение: Историческая справка
- Опыт исследования миграции радионуклидов на участках загрязнения подземных вод
- Захоронение РАО в геологических формациях
- Выводы

# ИСТОЧНИКИ РАДИОНУКЛИДОВ – РАО И ВЫБРОСЫ НА АЭС



Предприятия ядерно-технологического цикла



Атомные станции и энергетические установки



Научно-исследовательская деятельность и медицина



Примечание: ОИАЭ - источники РАО: накоплено (ГК «Росатом») около 4 млрд. Ки

## ОСНОВНЫЕ НОСИТЕЛИ РАДИОНУКЛИДОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Подземные воды и поверхностный сток



# СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С РАО В ИСТОРИЧЕСКОМ КОНТЕКСТЕ



## Объекты накопления/хранения РАО (1951 г. – н.в.)

Поверхностные водные объекты



Челябинск-65, Томск-7



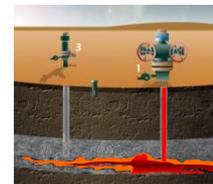
Поверхностные хранилища



Система «Радонов»



Геологические формации

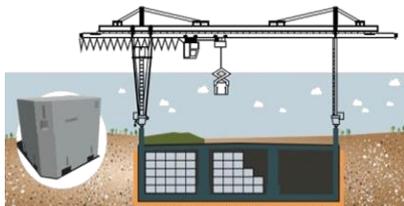


Томск-7, Красноярск-26, Димитровград

## Объекты окончательной изоляции РАО (190-ФЗ «Об обращении с РАО...», 2011 г.)

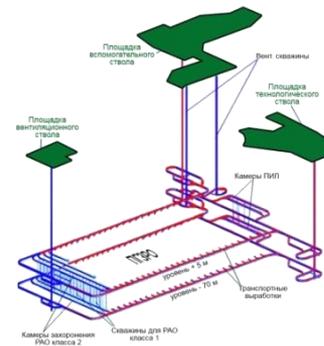
ПЗРО – поверхность земли или ниже поверхности до глубины 100 м

НАО, САО



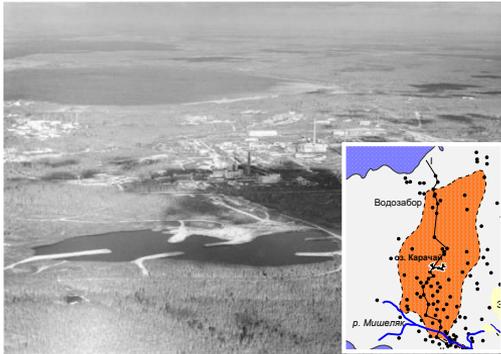
ПГЗРО в гнейсах на глубине 450-450 м (Красноярский край)

САО, ВАО

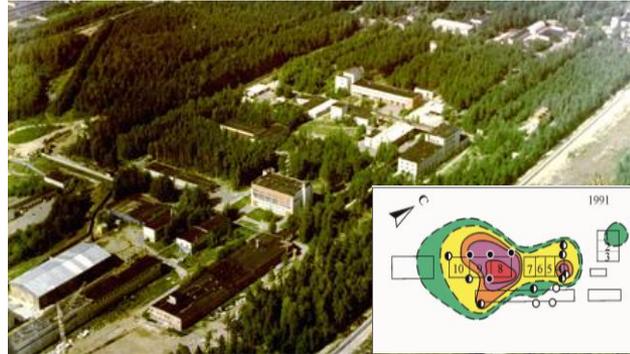


# Что получено нового в научном знании о миграции радионуклидов (по результатам изучения ореолов радиоактивного загрязнения)

**«оз. Карачай»**  
(Челябинская обл.)



**ЛСК «Радон»**  
(Ленинградская обл.)



**Полигон захоронения ЖРО на СХК**  
(Томская обл.)



# «оз. Карачай» (1)

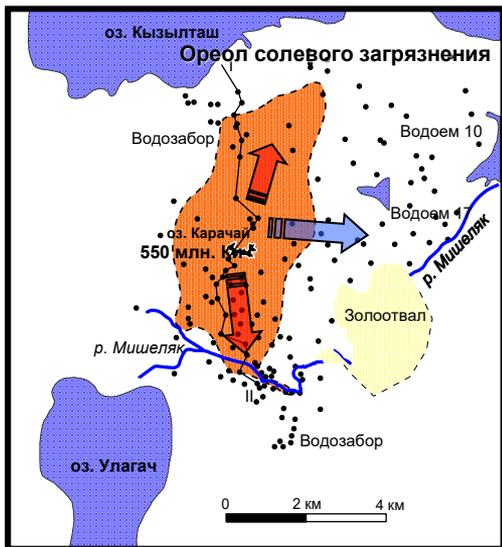


1. Факторы, контролирующие миграцию рессолов в неоднородных трещиноватых массивах

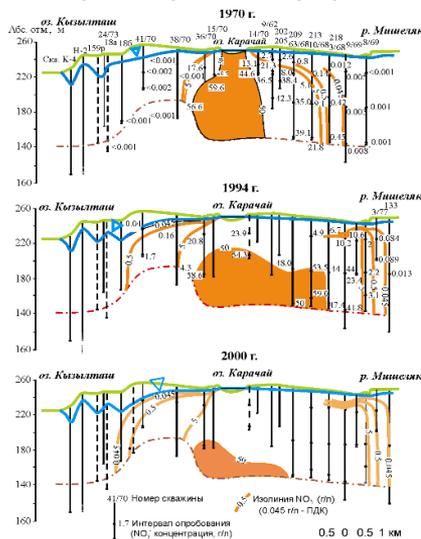
2. Геостохастическое моделирование (вариограммный анализ) для построения карт проницаемости

ПО «Маяк», ФГУП ВНИПИЭТ, ФГУП «Гидроспецгеология» 1968–2025 гг.

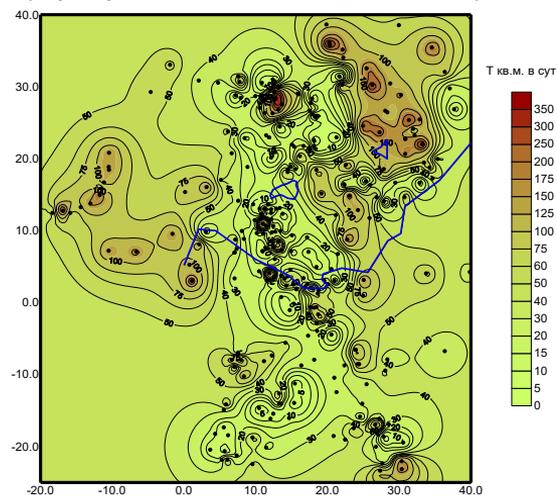
МГУ, каф. гидрогеологии



Ореол загрязнения в разрезе



Карта ожидаемых величин проводимости (вариограммный анализ, Поздняков, 1994)

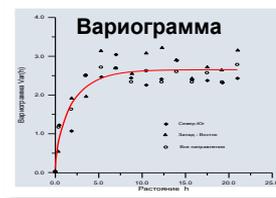


Продукты деления, Бк/л

- Sr-90: до  $1.5 \cdot 10^8$
- Cs-137: до  $3.3 \cdot 10^8$
- Tc-99: до  $1 \cdot 10^4$
- Co-60: до  $3 \cdot 10^4$
- Ru-106: до  $7.4 \cdot 10^3$

U и актиниды, Бк/л

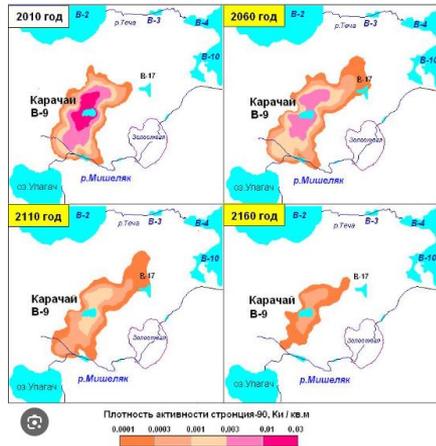
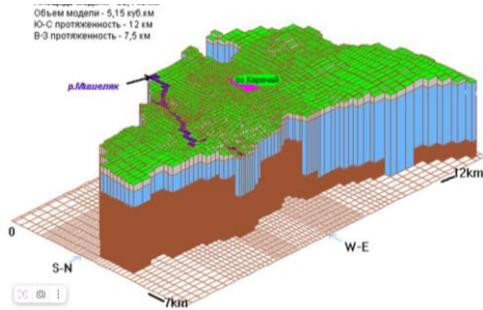
- U-235+238: до  $2.3 \cdot 10^3$
- Pu-239, 240: до 2.1
- Am-241: до 6.4
- Cm-244: до 14
- Np-237: до 18.2



## 3. Разработка и тестирование 3D моделей миграции разноплотностных жидкостей

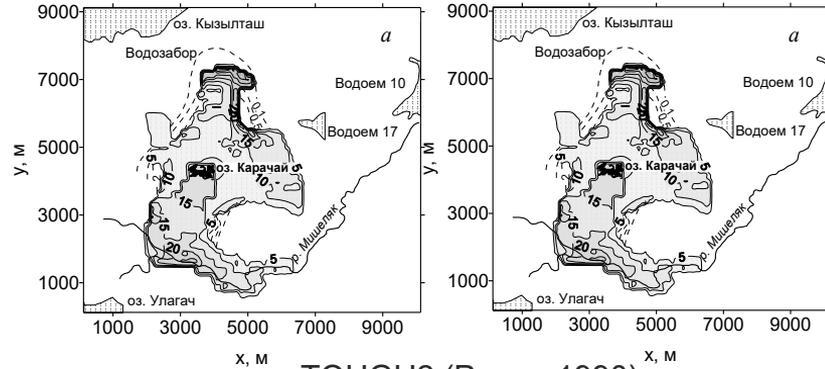
ФГУП «Гидроспецгеология», 1993 г.

GEON-3DM (Зимин, 1990)

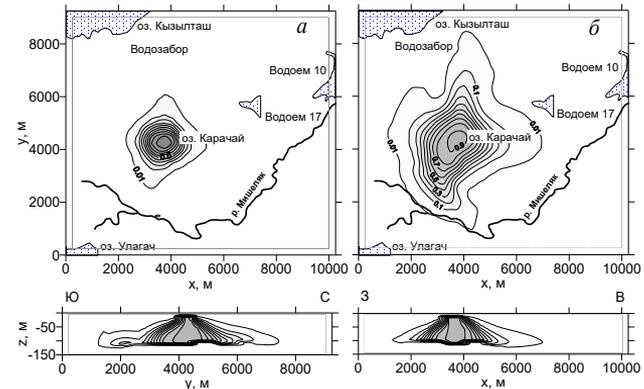


ИГЭ РАН, СПб Отделение, 1998 г.

DENFLOW (Коносавский, 1995)



TOUGH2 (Prues, 1990)



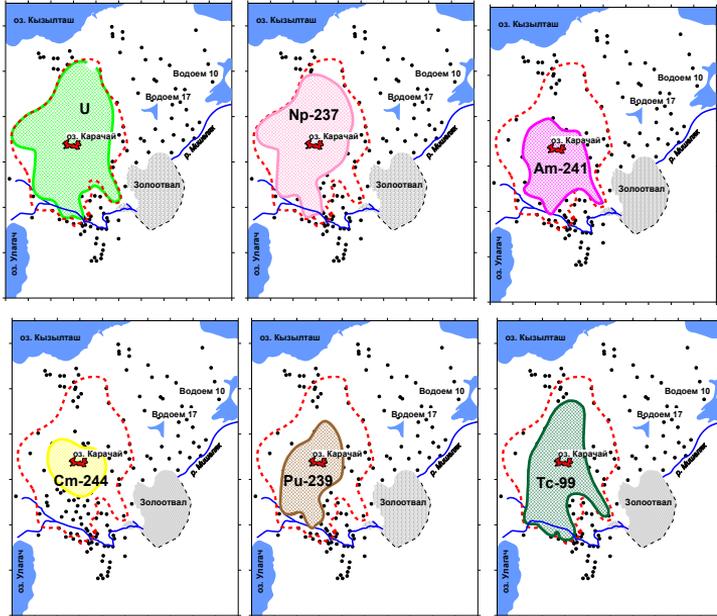
# «оз. Карачай» (3)



4. Факторы, определяющие высокую мобильность РН: комплексообразование, адсорбция на коллоидах, подвижные ионообменные барьеры

5. Развитие аналитической и инструментальной базы

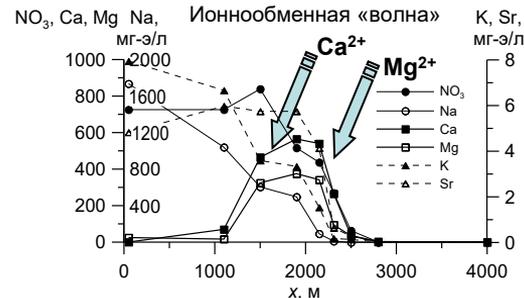
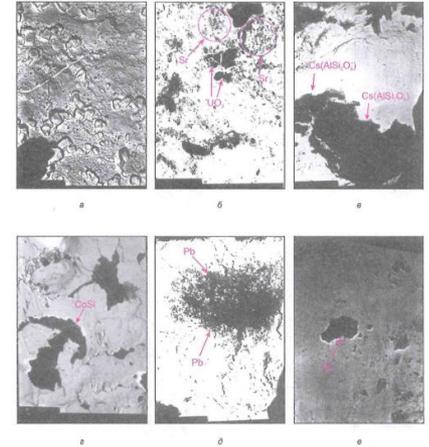
ПО «Маяк»: Ореолы U+Актиниды  
(данные мониторинга 2009 г.)



ИГЕМ РАН: Гидрогеохимический зонд  
(Солодов, 1995)



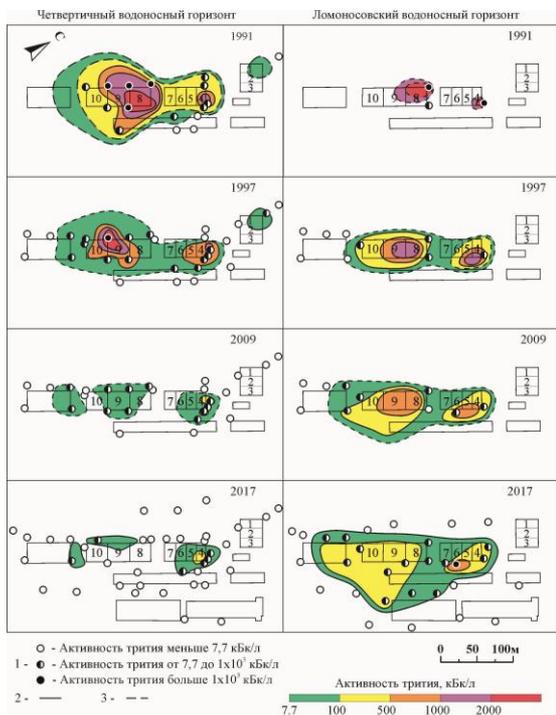
ПО «Маяк»: Радиография керна скважин  
(Дрожко, 1996)



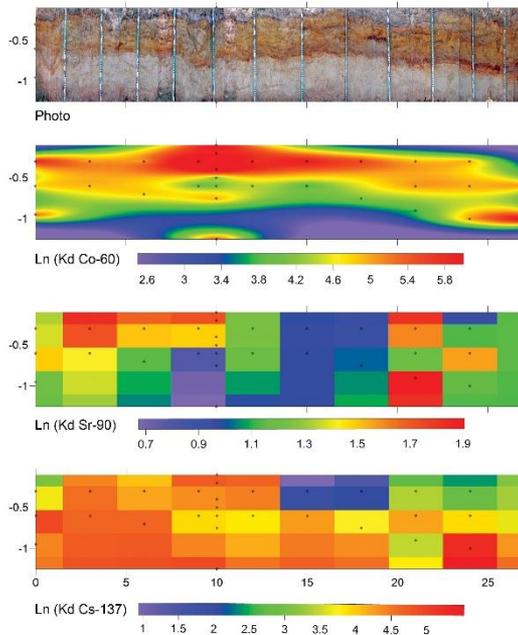
Механизмы иммобилизации:  
– физическая сорбция,  
– изоморфное вхождение нуклидов в минералы

- 6. Сильные расхождения в параметрах сорбции, получаемых в лаборатории и по данным наблюдений in-situ
- 7. Влияние вертикальной компоненты скорости фильтрации, наведенной инфильтрацией, на структуру ореолов
- 8. Показана пространственная изменчивость констант сорбции и определены параметры стохастических моделей

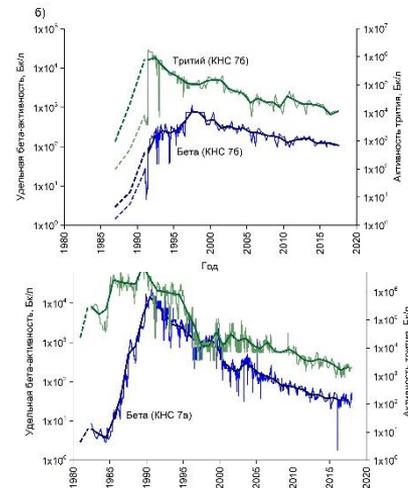
Динамика ореола загрязнения в двух горизонтах (40-летний период)



Стохастическое поле Kd для Sr-90 (на основе полевых опробований)



Мониторинг радионуклидов в скважинах



Сопоставление полевых и лабораторных определений Kd

Метод	Kd, мл/г	
	Sr-90	Cs-137
<i>In situ</i>	6-67	3-470
Лаборатория	44-220	13-3300

# «Полигон захоронения ЖРО СХК» (1)

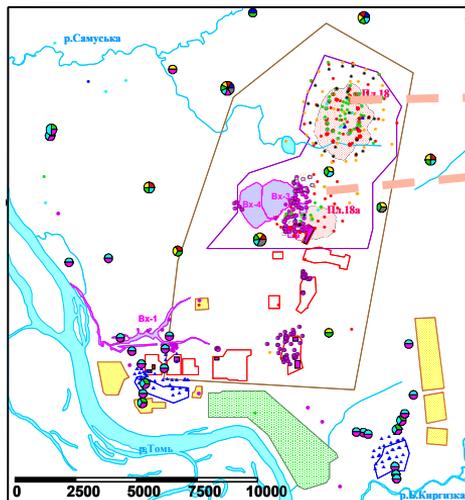


9. В данный исторический период технология глубинного захоронения жидких РАО как альтернатива поверхностным хранилищам себя полностью оправдала

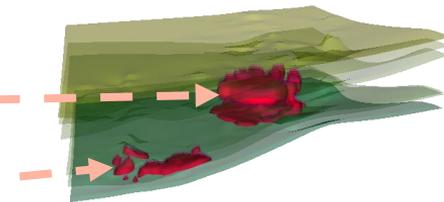
Справка: Параметры действующих полигонов глубинного захоронения жидких РАО

Полигон	Ввод в эксплуатацию	Глубина, м	Коллектор	М ПВ, г/л	Объем, млн. м <sup>3</sup>	Активность, млн. Ки
Томск-7	1963 г.	350–400	Гл. пески	< 1	45	1100
Красноярск-26	1962 г.	400–480	Гл. пески	< 1	6	450
НИИАР	1966 г.	1100-1500	Песч./карб. породы	200–260	3	100 (?)

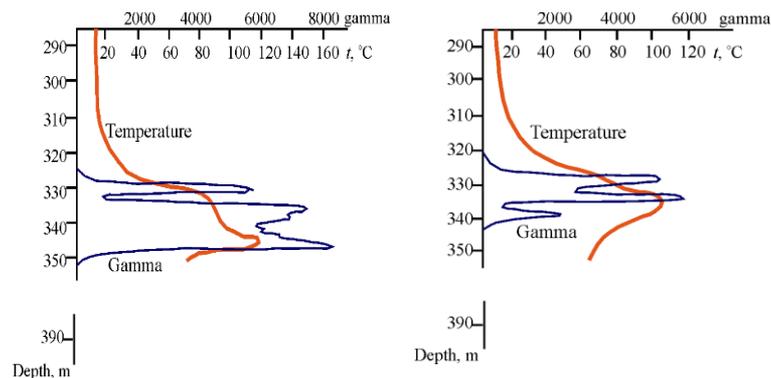
Расположение объектов загрязнения ПВ



Ореолы загрязнения



Т-гамма каротаж скважин: тепловыделение

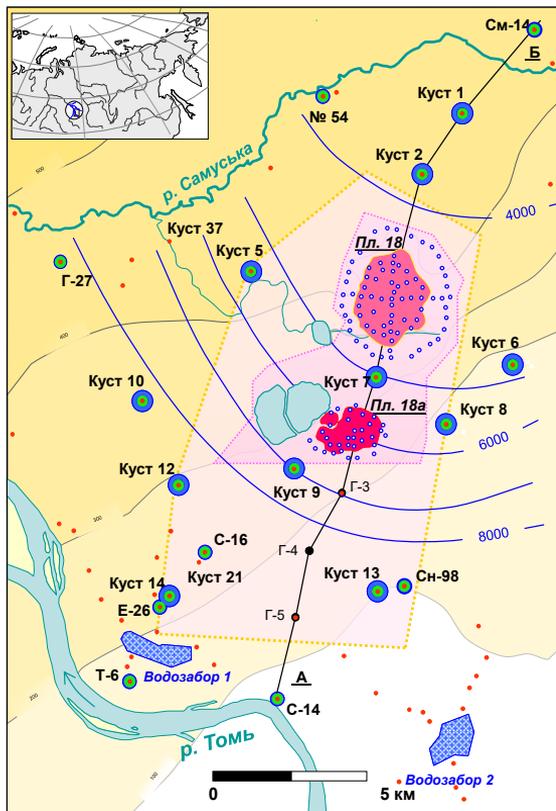




# «Полигон захоронения ЖРО СХК» (3)



## 12. Возраст ПВ, определяемый изотопным U/He-4, важная характеристика в системе ОДБ



Сопоставление результатов расчетов средних скоростей миграции в водоносных горизонтах, м/год

Горизонт	<sup>4</sup> He-U метод	Рыбалченко и др., 1994	Shestakov et al., 2002
V	20.0	–	3
IV	8.0 (10)	–	10
III	2	3–5	1
I+II	2.4 (3.2)		



## ВЫВОДЫ

1. Наблюдаемое поведение радионуклидов в водоносных толщах часто не укладываются в традиционные представлений подземной гидродинамики и гидрогеохимии
2. Наблюдения за ореолами радиоактивного загрязнения водоносных горизонтов, сформировавшимися за более, чем полувековой период, поддержанные экспериментами, могут определить прогресс в развитии подземной гидродинамики на ближайшие десятилетия
3. Такого рода анализ и научные разработки позволят повысить эффективность и надежность обоснования безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях, что является предметом второй части настоящей презентации



## Гидрогеологические исследования в связи с захоронением РАО в геологических формациях

- Глинистые формации
- Трещиноватые гранитогнейсы



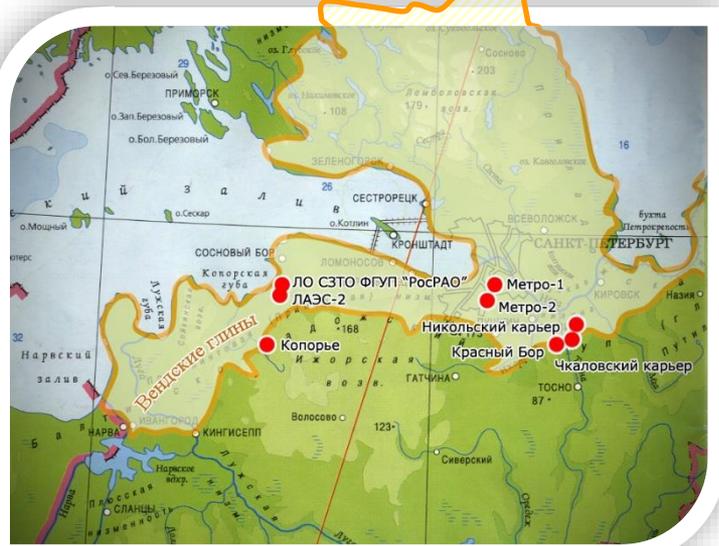
### РФ–зарубежные объекты-аналоги

Геологические формации	Россия	Западная Европа (Бельгия, Франция)	Скандинавия (Швеция, Финляндия)
<b>ГЛИНЫ</b>	Венд, кембрий Сосновый Бор	ВС, Cox Mol/Dessel, Meuse	
<b>КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ</b>	Гнейсы, архей (Красноярский край)		Граниты, архей Forsmark, Aspö



# ПЗРО в вендских глинах С.-Петербургского региона

## Изучение региональных закономерностей изменчивости свойств глин СПб региона



### Исследуемые свойства

- Свойства, определяющие геотехнические условия строительства и эксплуатации хранилища (прочностные и деформационные свойства пород)
- Свойства, контролирующие безопасность хранилища с точки зрения радиационного воздействия на подземные воды и сопредельные среды

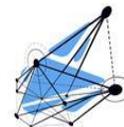
### Методы исследований



Бурение скважин, их каротаж и отбор образцов

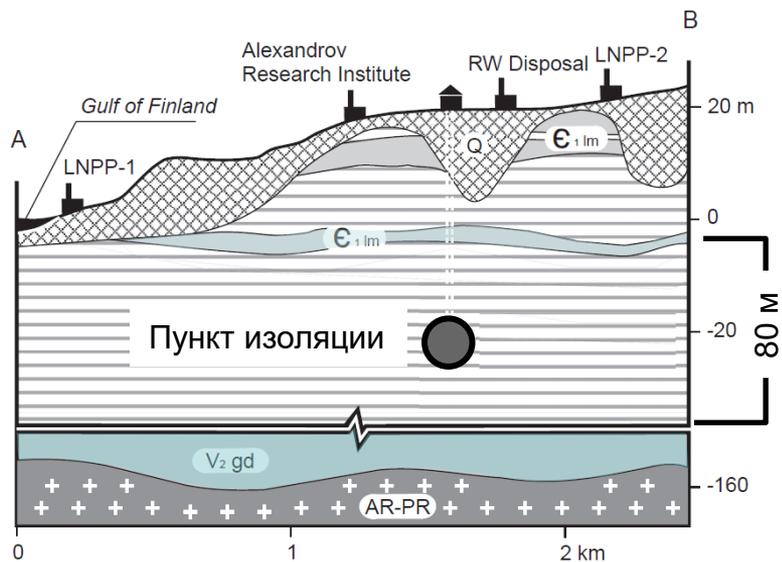


Лабораторные эксперименты

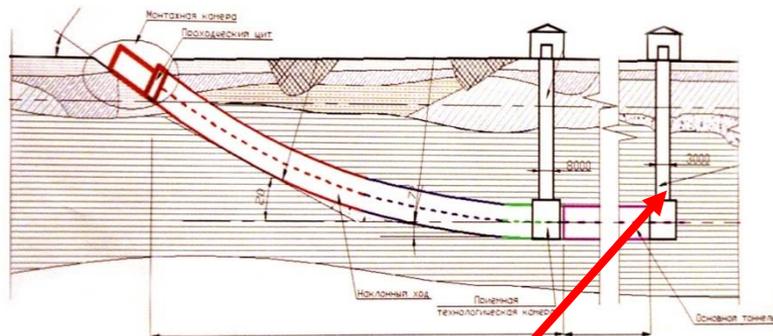


Математическое моделирование

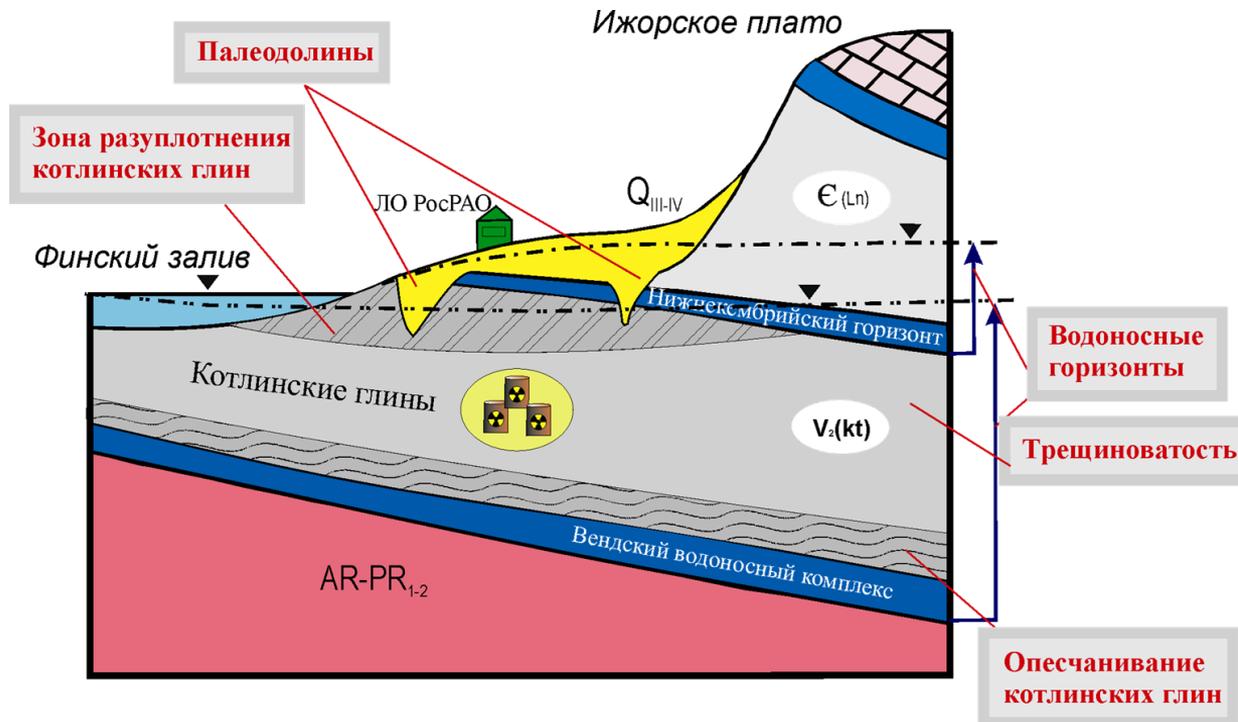
## Геологический разрез участка строительства



## ВНИПИЭТ: концепция ПЗРО (Сорокин, 1999)



# Геологические факторы, потенциально влияющие на строительство ПЗРО, и свойства пород



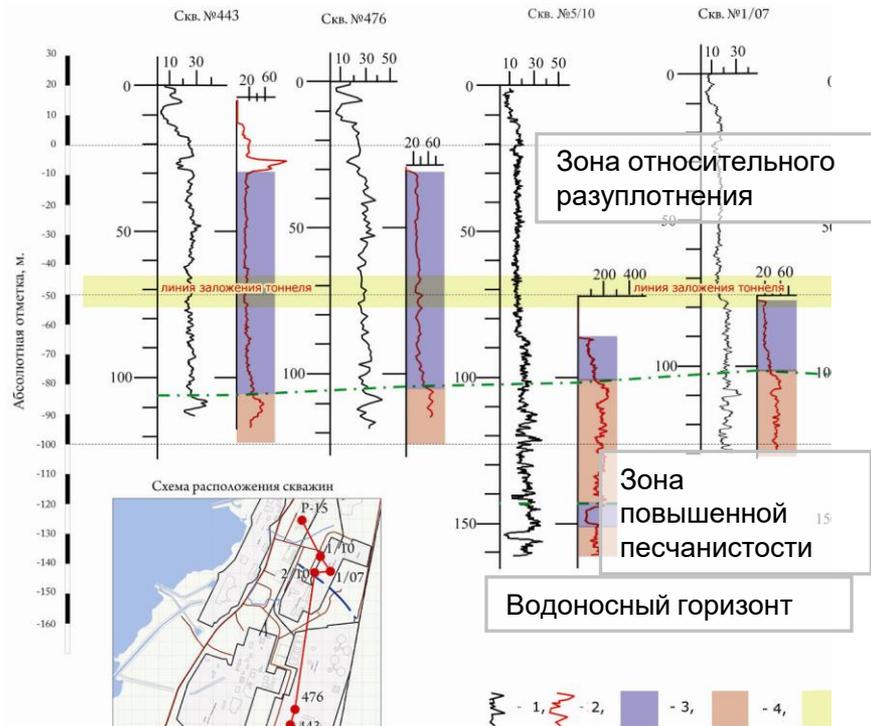
## Исучаемые свойства

- Свойства, определяющие **геотехнические условия строительства и эксплуатации** хранилища (прочностные и деформационные свойства пород)
- Свойства, контролирующие **безопасность хранилища** с точки зрения радиационного воздействия на подземные воды и сопредельные среды

# Бурение глубоких скважин и отбор проб

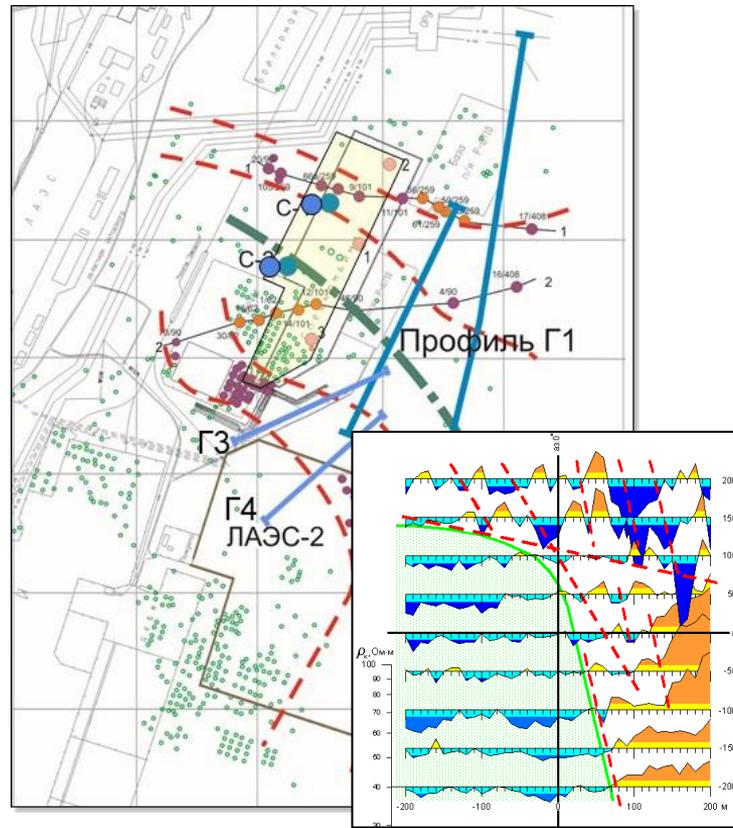
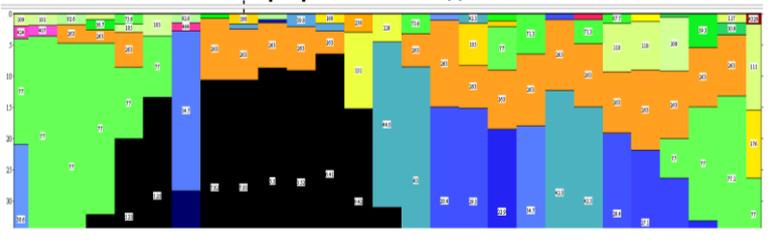


## Выделение зон неоднородности в разрезе





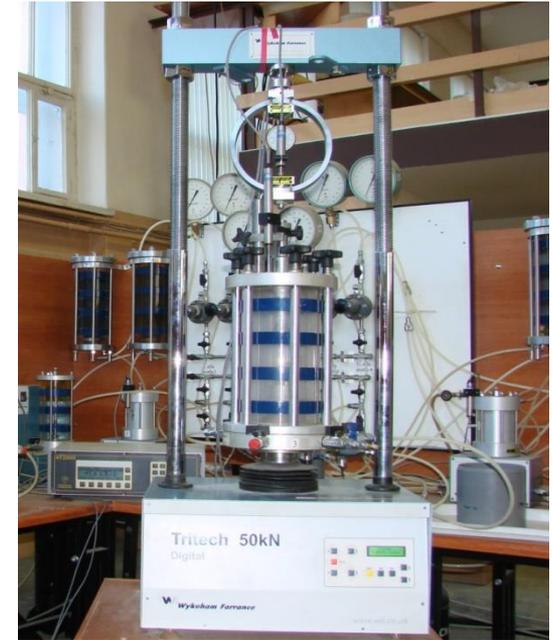
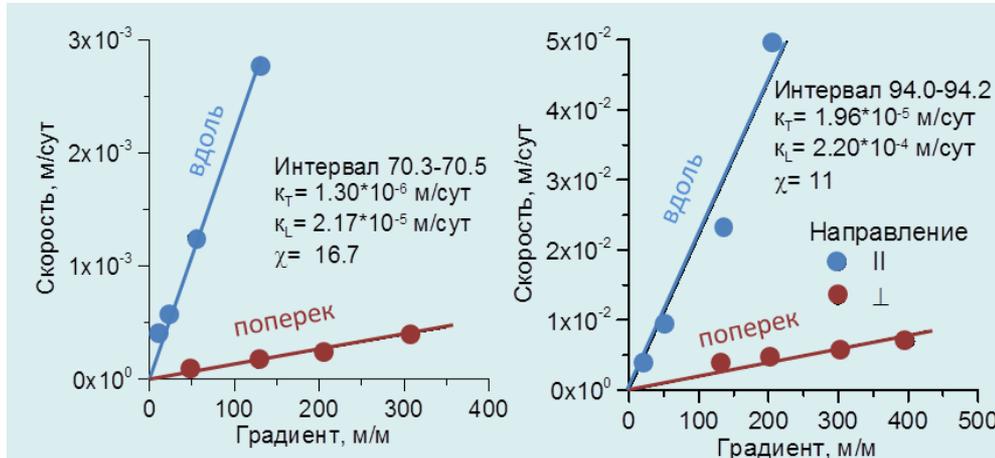
Профиль Г1. Метод ВЭЗ



## Проницаемость глин:

Вертикальный коэффициент фильтрации лежит в диапазоне от  $5 \times 10^{-7}$  до  $2 \times 10^{-5}$  м/сут, а горизонтальный от  $4 \times 10^{-6}$  до  $2 \times 10^{-4}$  м/сут. Выявлена сильная анизотропия параметра (до 16), которая объясняется тонкой слоистостью глинистых отложений.

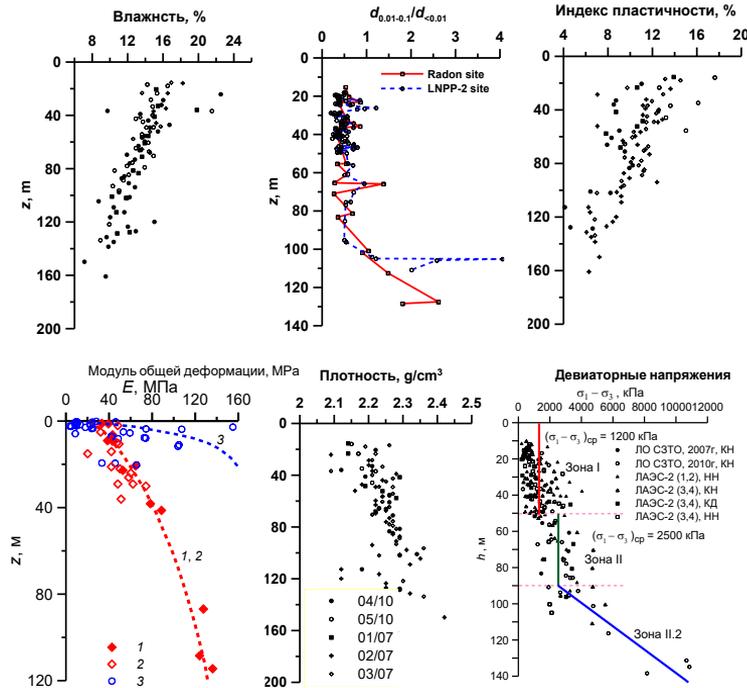
Определение коэффициентов фильтрации котлинских глин



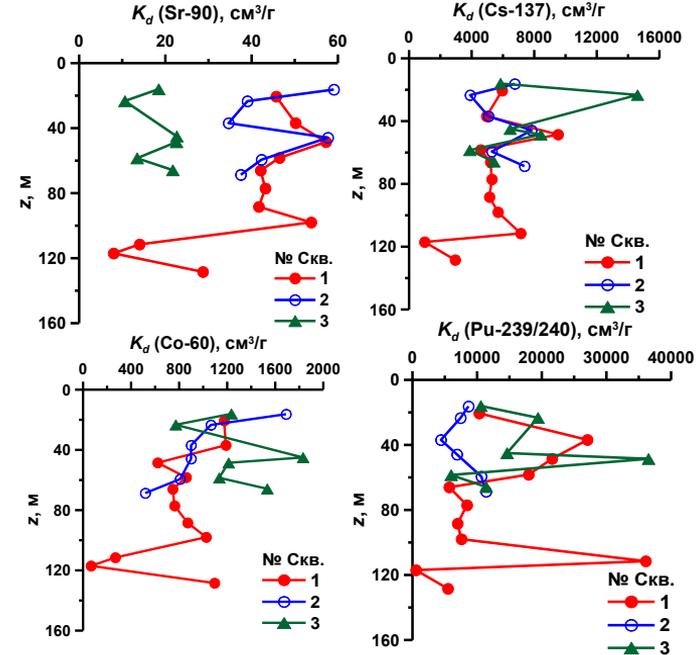
Установка трехосного сжатия  
Wykeham Ferrance

# Изменчивость физико-механических и сорбционных свойств глин в разрезе

## Физико-механические свойства

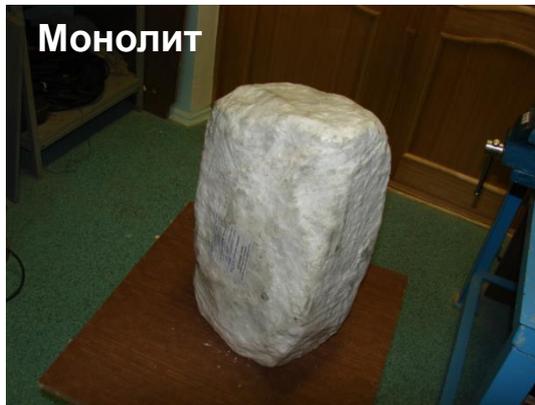


## Коэффициент сорбционного распределения



# 3D диффузионный эксперимент (продолжительность примерно 2 года)

**Монолит**



**Инъекционная скв.**



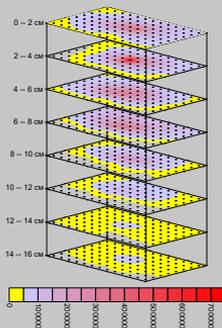
Co-60 – 1 ml:  $2 \cdot 10^{-5}$  Ci  
 Sr-90 – 1 ml:  $2.2 \cdot 10^{-5}$  Ci  
 Pu-239,240 – 1 ml:  $7.2 \cdot 10^{-7}$  Ci  
 Cs-137 – 0.2 ml:  $3 \cdot 10^{-5}$  Ci  
 Cl-36 – 0.1 ml:  $9.8 \cdot 10^{-5}$  Ci



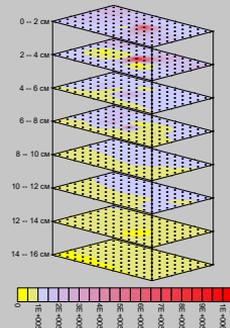
## Распределение радионуклидов в глине (монолите)



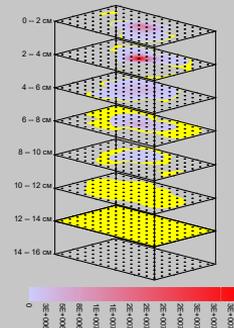
**Sr-90**



**Cl-36**



**Co-60**



# ВЫВОДЫ

## Вывод 1: Вендские глины обладают достаточными барьерными свойствами



- Установлены факторы, влияющие на изменение свойств глин в разрезе
- Проявление анизотропии характерно для всех изученных физико-механических и физико-химических свойств глин

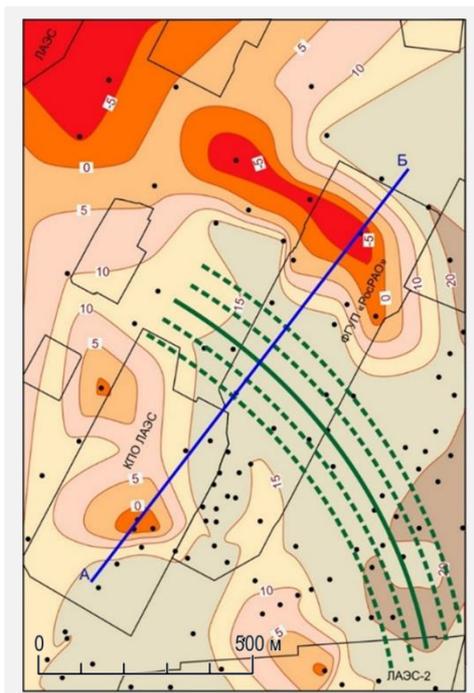
Показатель анизотропии	Свойства			
	Деформационные	Прочностные	Диффузионные	Проницаемость
$E_h/E_v$	1.4			
$C_h/C_v$		1.5–2		
$D_h/D_v$			2–6	
$k_h/k_v$				5–250

- Сравнительный анализ с глинистыми формациями европейских стран – кандидатами для строительства ПЗРО (Boom, Callovo-Oxfordian, Opalinus, and Kothlin): по барьерным свойствам сопоставимы

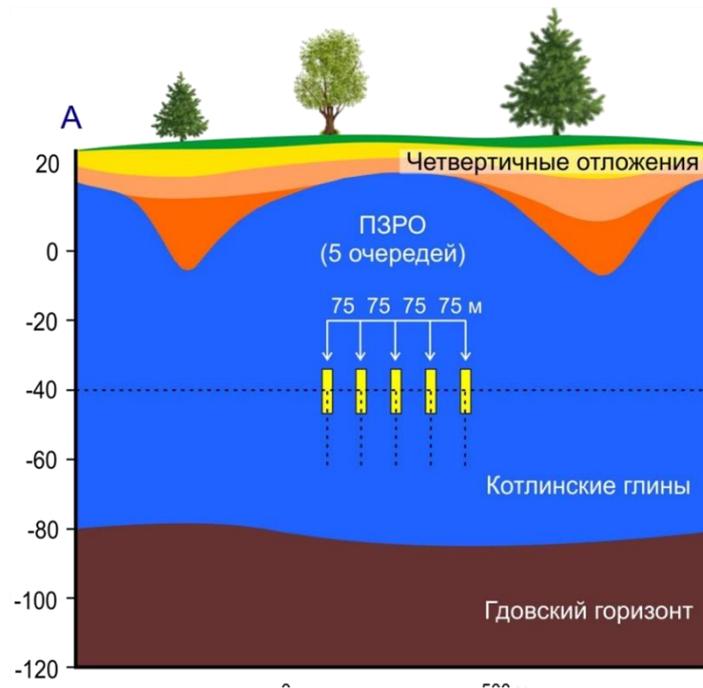
# Итог: Обоснование месторасположения ПЗРО

Факторы, определившие положение ПЗРО:  
разуплотнения глин сверху, опесчанивания глин снизу  
границы палеодолин в плане

Оптимальное расположение ПЗРО в разрезе



Оптимальное расположение ПЗРО в разрезе



# Ответ на вопрос почему проект создания ПЗРО в вендских глинах приостановлен



Две причины:

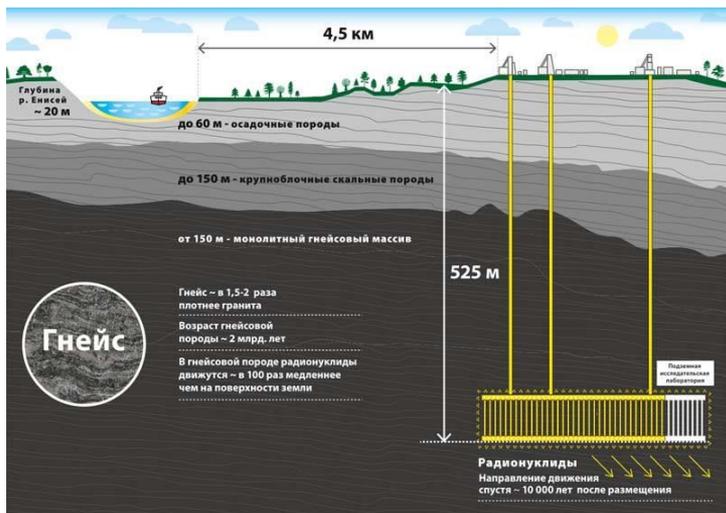
- Экономическая нерентабельность
- Противодействие общественности



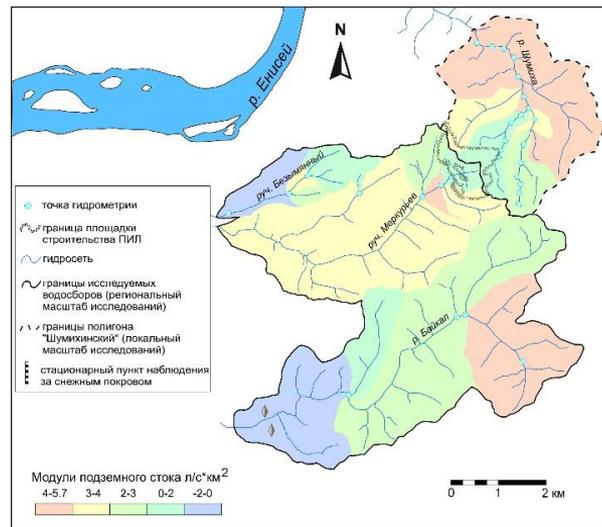


# ПГЗРО в трещиноватых гнейсах Красноярского края

**Направление 1:** Изучение гидрогеологических условий и параметров миграции радионуклидов в массиве



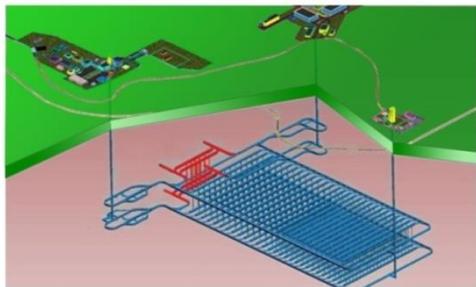
**Направление 2:** Изучение водного баланса участка и мониторинг состояния геологической среды



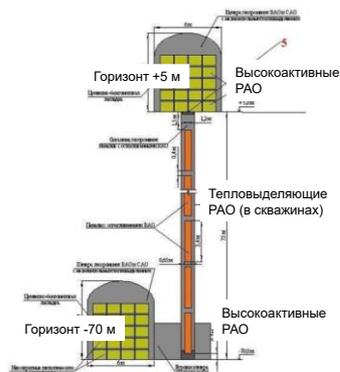
# Направление 1. Изучение гидрогеологических условий и параметров миграции радионуклидов в массиве

- Опытное изучение гидрогеологических параметров массива
- Построение модели проницаемости гнейсового массива методом многоточечной геостатистики
- Построение математических моделей, учитывающих формы переноса и фазы-носители активности – жидкая, коллоидная или газовая
- Определение времени достижения радионуклидами зон разгрузки потока ПВ в биосферу
- Расчет активностей радионуклидов и их массовые потоки

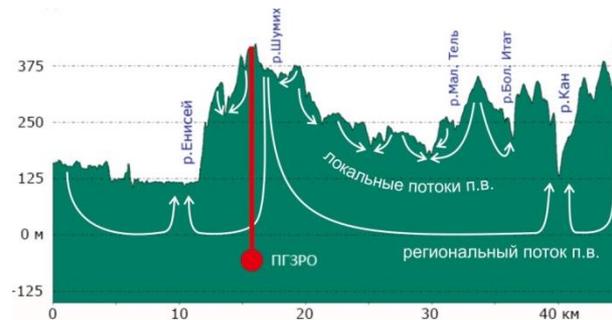
Концептуальная схема ПГЗРО



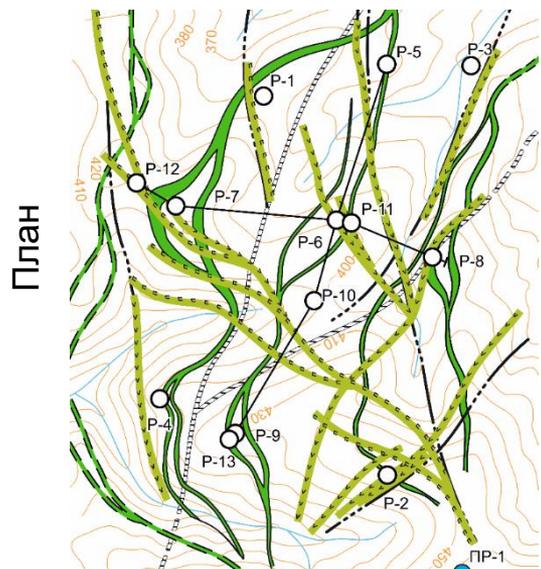
Конструктивные особенности



Концепция фрагментации потока подземных вод



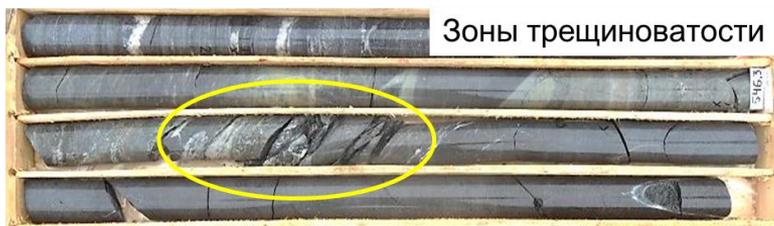
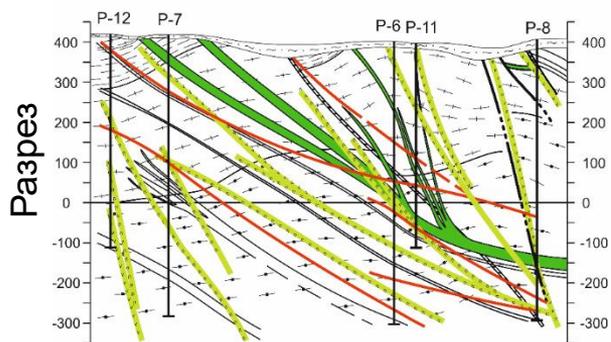
# Геологический облик участка размещения ПГЗРО



Гнейсовый массив пронизан долеритовыми **дайки** двух генераций. Простираение даек маркирует главные направления тектонических напряжений региона.

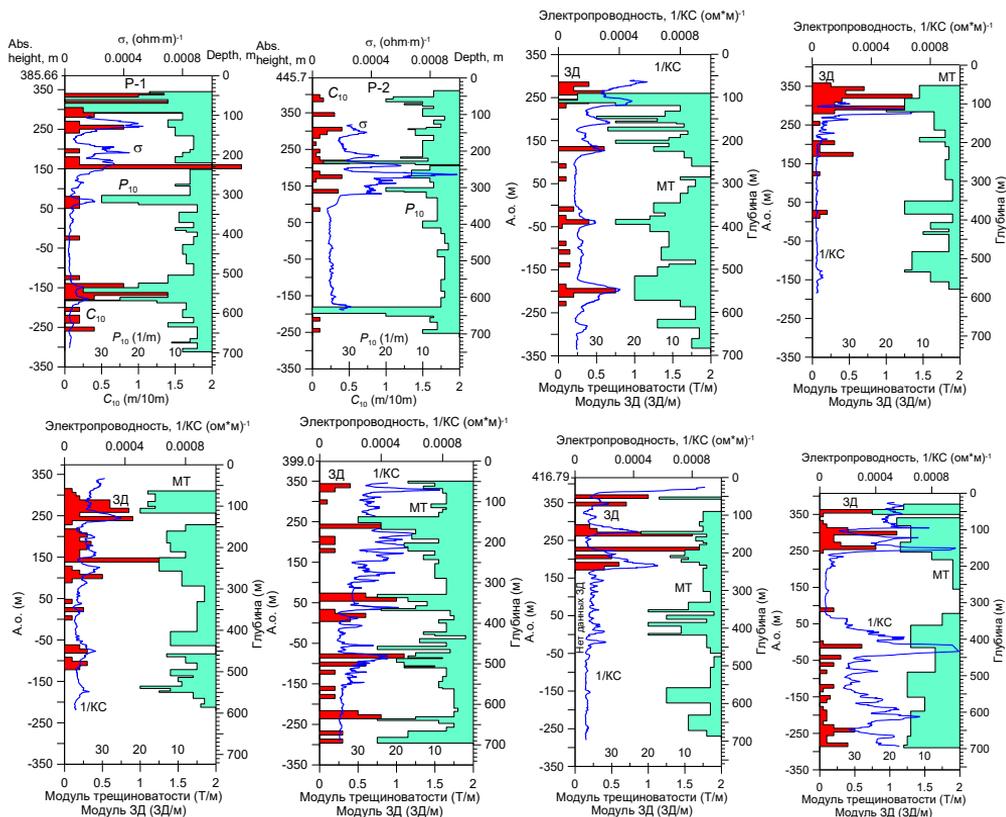
Керн характеризуется фоновым модулем трещиноватости ( $M_{тр}$ ) 5-10 тр./м. На некоторых локальных участках **сетка трещин** сгущается до 20-40тр./м.

Помимо трещин в керне выделяются **зоны дробления**.

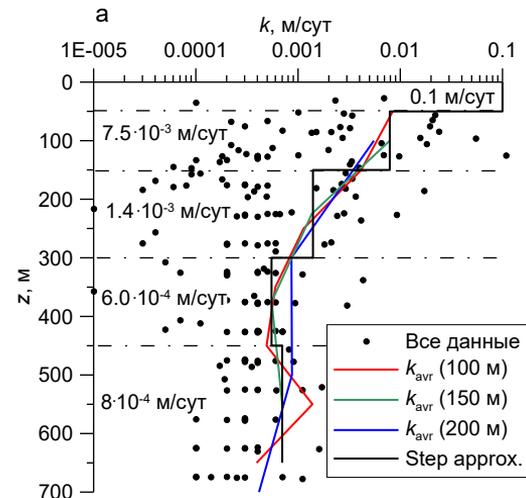


# РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

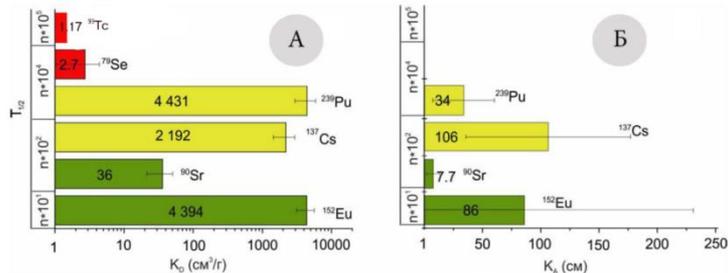
## Зоны дробления



## Изменение проницаемости с глубиной

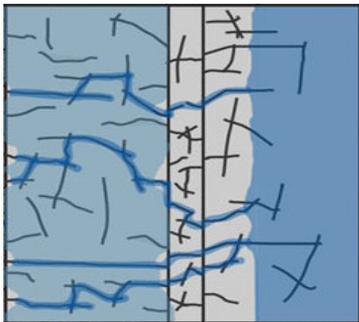


## Коэффициенты сорбции радионуклидов Kd



# Эффект фокусировки потока подземных вод

Сочетание хорошо и плохо проводящих зон приводит к фокусировке фильтрационного потока.



10 % тектонических зон обеспечивают 95 % притоков в подземную выработку.

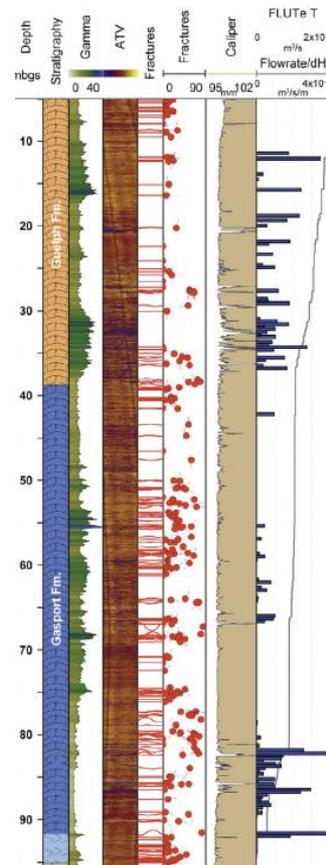
При фильтрационном контрасте между зонами в 5 порядков работает только канал, в противном случае и канал и вмещающая матрица.

## Специфика:

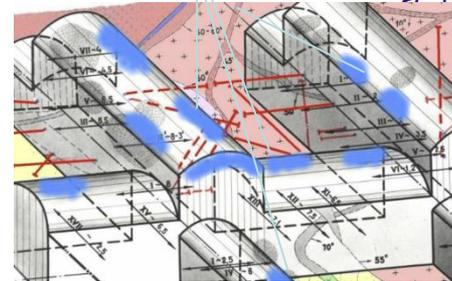
Трещиноватые среды склонны к формированию фокусированных потоков подземных вод.

Такая структура, с одной стороны, значительно усложняет геометрию потока и делает задачу выявления путей миграции сильно неопределенной. С другой стороны, многократно увеличивает скорость фильтрации.

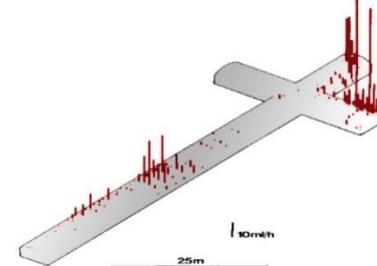
## Расходомерия скважины



## Притоки в горную выработку гнейсы/Красноярск

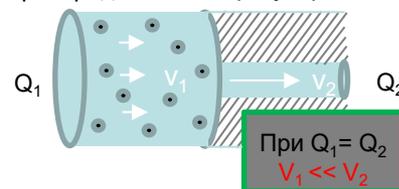


## Притоки в горную выработку Stripa site, граниты/Швеция



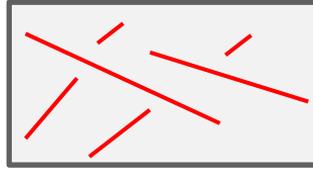
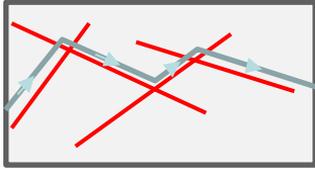
## Опасность при моделировании

Поток: распределенный / фокусированный



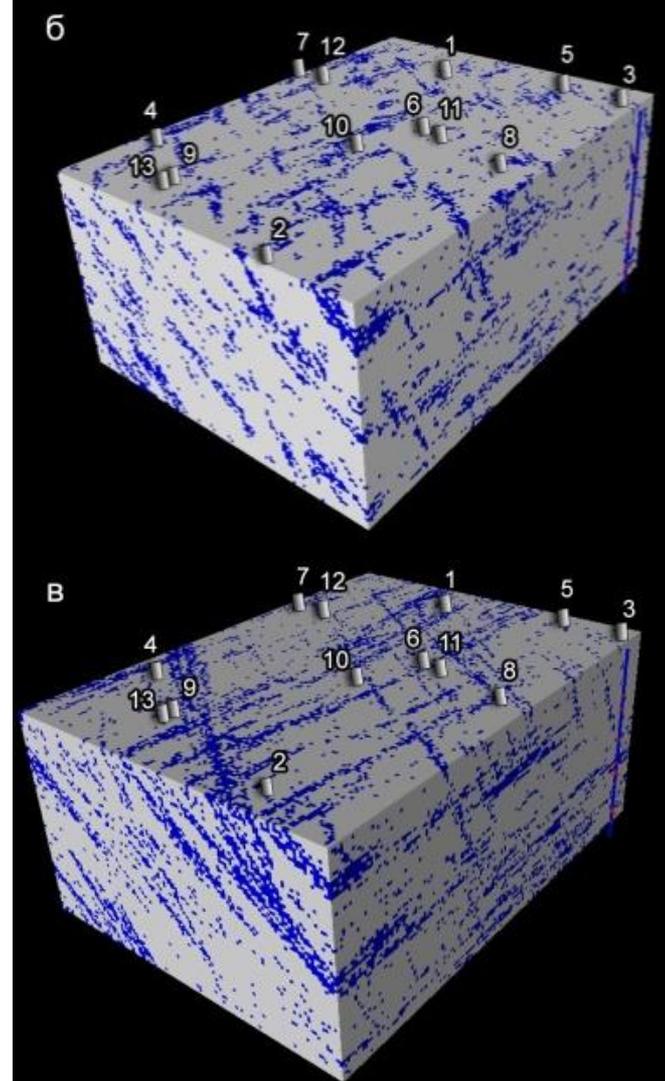
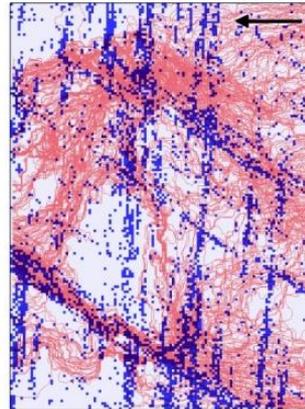
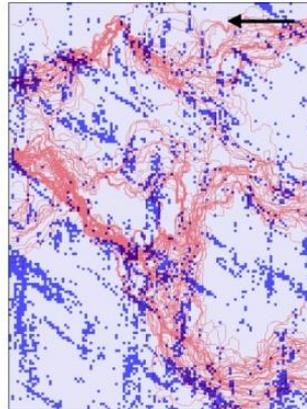
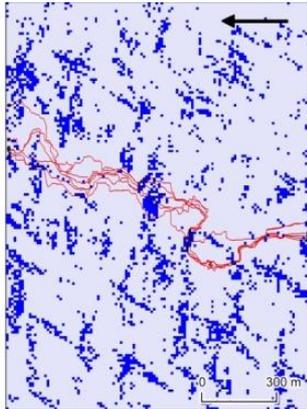
## Связность трещин и порог перколяции

Связано / не связано ...



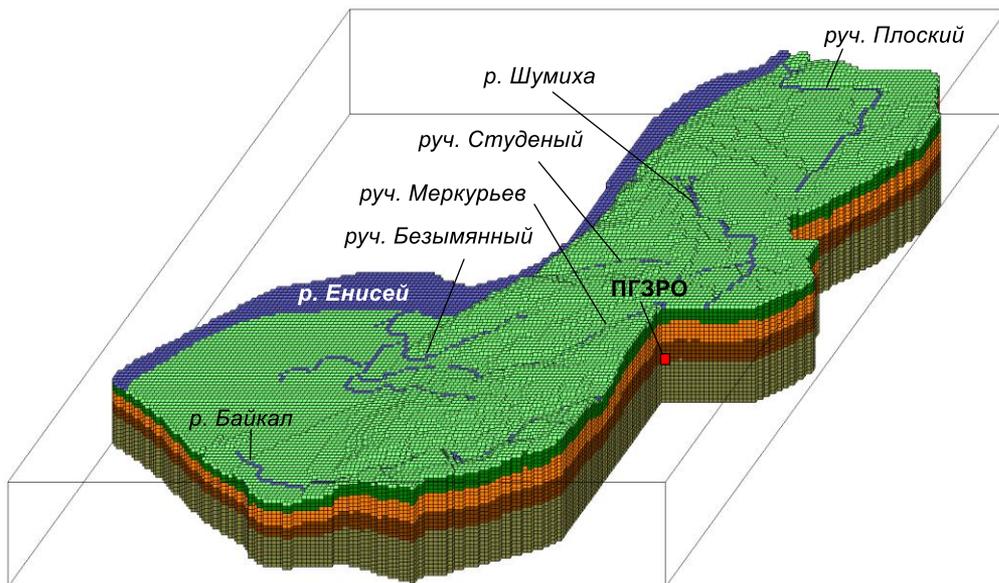
Связанность трещинной системы зависит от плотности трещин, их геометрических размеров и ориентировки.

Если система трещин не будет связанной (не достигнут предел перколяции), то фильтрация в массиве будет возможна только через слабопроницаемую матрицу.

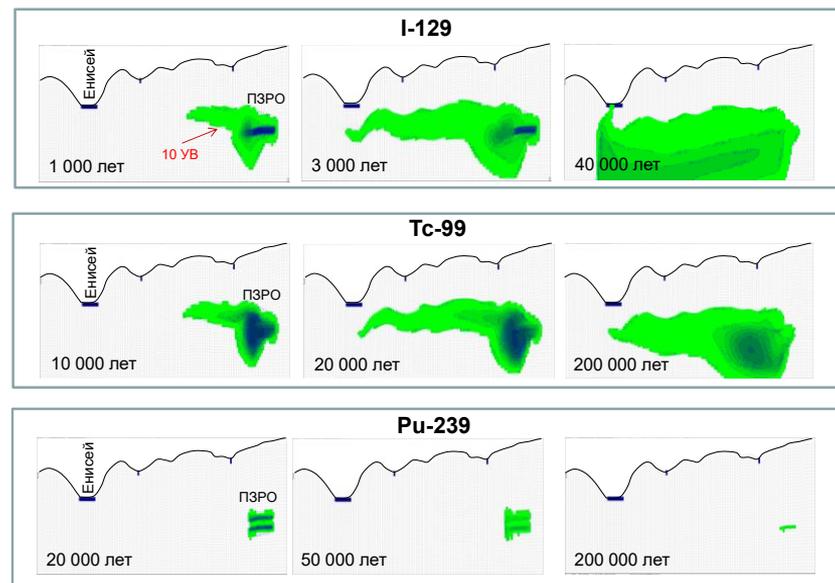


# МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В МАССИВЕ

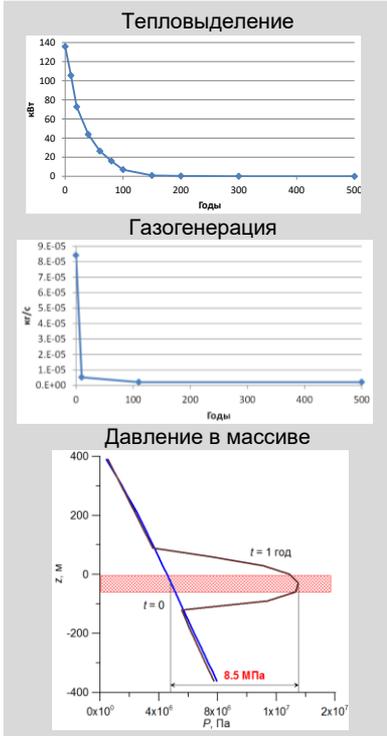
## 3D модель



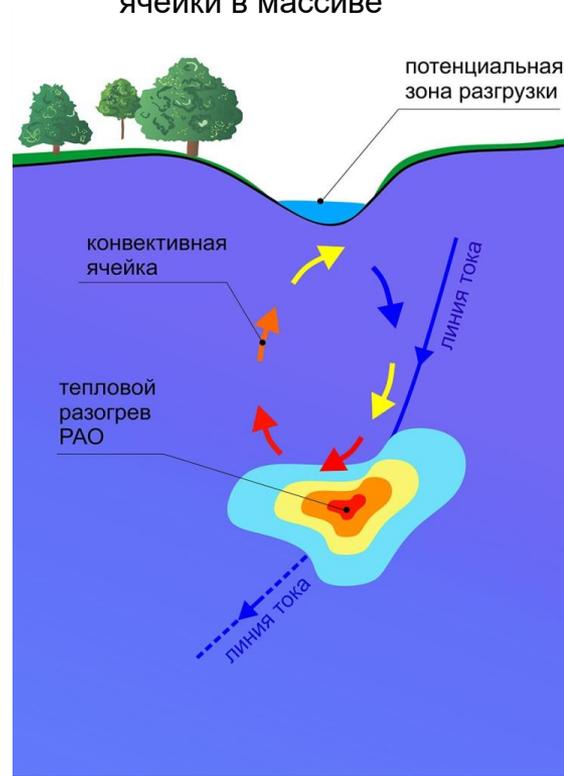
## Пример прогнозных оценок



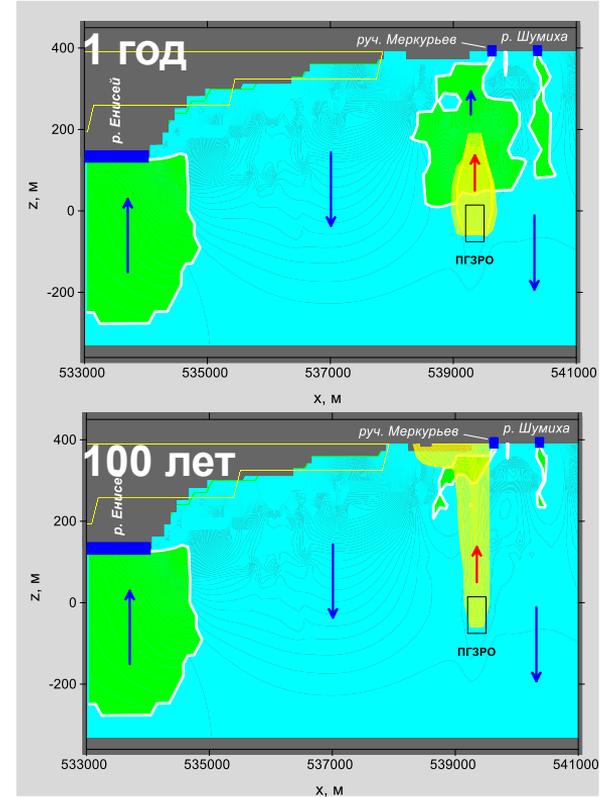
## Процессы в горных выработках



## Формирование конвективной ячейки в массиве

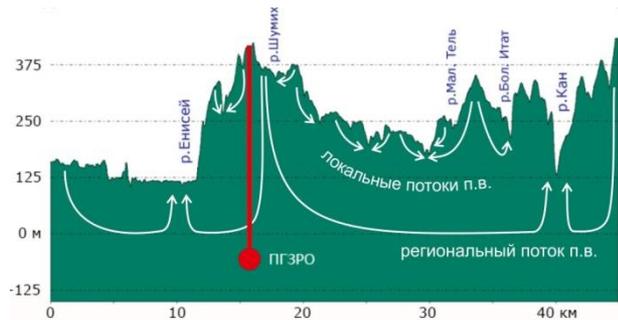
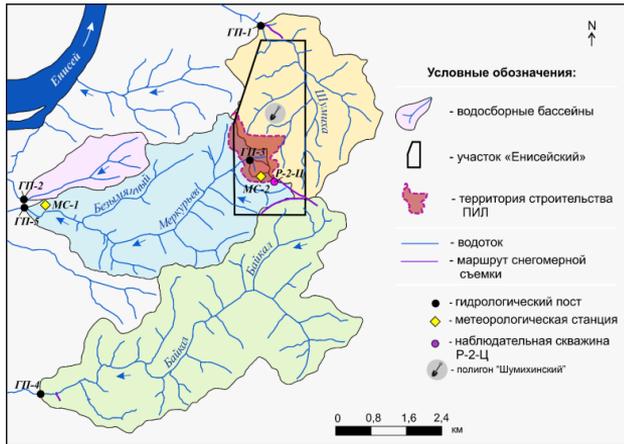


## Прогноз



# Направление 2. Воднобалансовые исследования и мониторинг состояния геологической среды

**Цель:** определение доли атмосферных вод, поступающих на интервал захоронения РАО, и взаимосвязь подземных и поверхностных вод

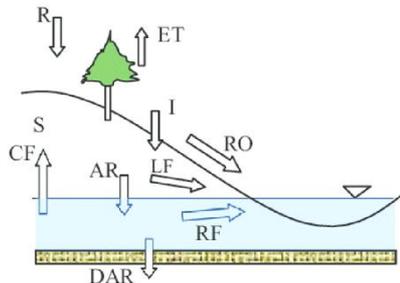


**Период наблюдений:** с 2017 г. по настоящее время

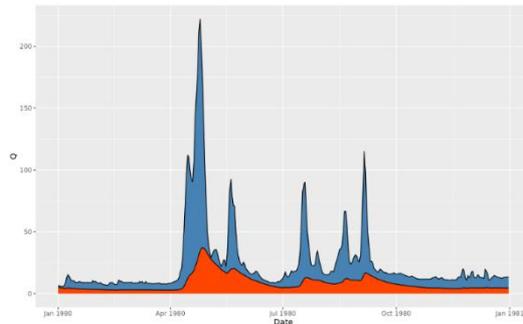


# Основные методы исследования

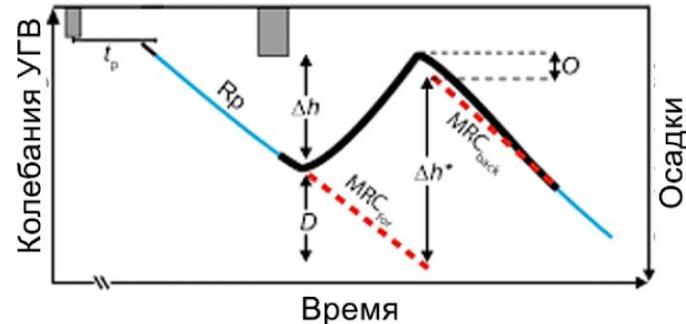
## 1. Оценка водного баланса водосборов малых рек и ручьев



## 2. Расчленение гидрографа рек



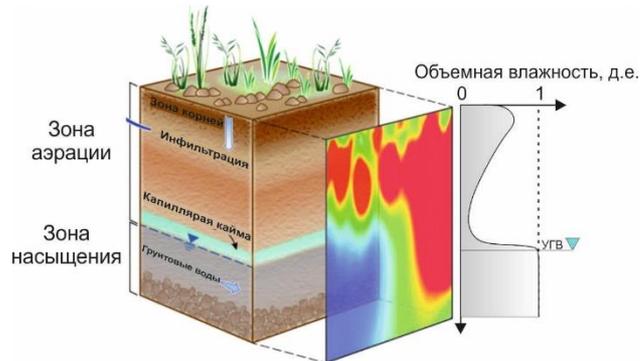
## 3. Режимные наблюдения за уровнями подземных вод



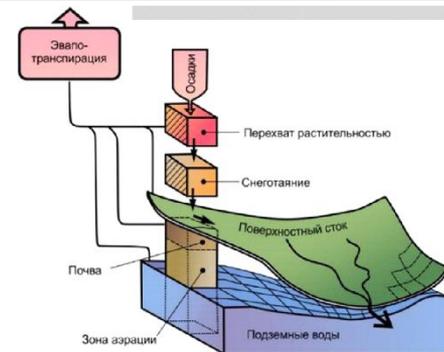
## 4. Полевые и лабораторные исследования тепло- и влагопереноса в зоне аэрации



## 5. Численное моделирование тепло- и влагопереноса в зоне аэрации



## 6. Численное моделирование поверхностного и подземного стока



# Полевые исследования в зоне аэрации



Основной вид полевых работ – оборудование трех ключевых участков датчиками и регистраторами данных для наблюдений за влажностью и температурой грунтов до глубин 2 м, а также атмосферными осадками

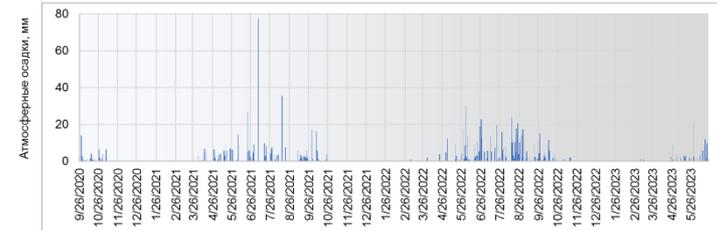
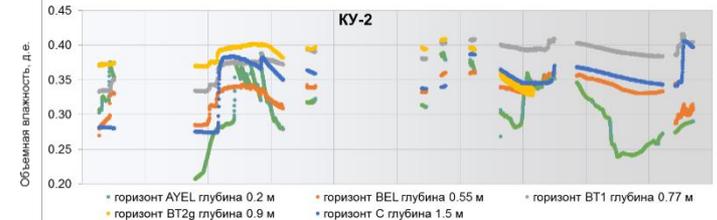
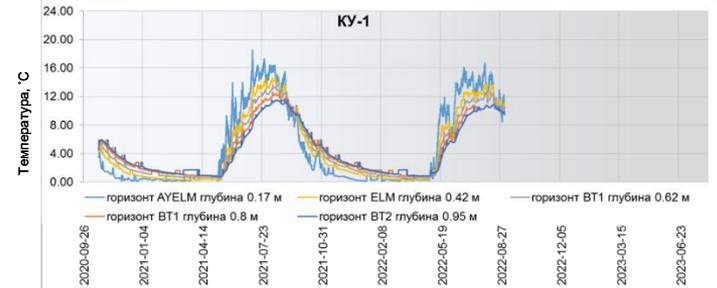
Общий вид шурфа с датчиками температуры и влажности



Процесс установки датчиков

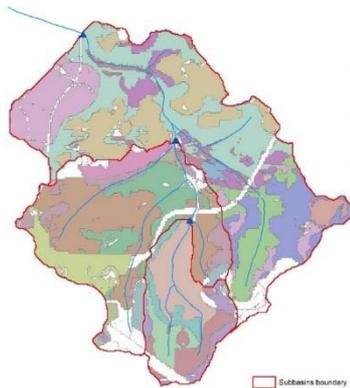


Примеры результатов измерений



# Численные модели поверхностного и подземного стока

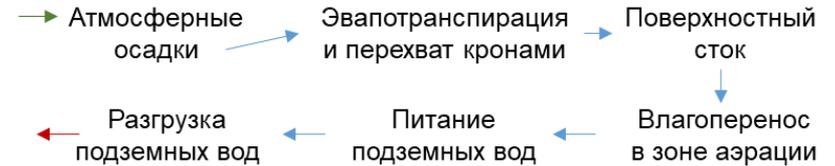
**SWAT** – модель с сосредоточенными параметрами



**GSSHA** – модель с распределенными параметрами



## Базовые процессы в моделях



**Установлено, что:**

- ❑ 100-170 мм от годовой суммы осадков формируют инфильтрационное питание;
- ❑ Существенную роль в водном балансе играет почвенный сток (9-12 %);
- ❑ Поверхностный сток в пределах территории исследований незначителен (1-3 %)

## ВЫВОДЫ

Рассмотренные среды (глины и трещиноватые гнейсы) и связанные с ними участки являются перспективными для изоляции РАО, в то же время для трещиноватого массива остается большое поле для дальнейшего исследования, поскольку:

- изучаемая среда отличается высокой степенью гетерогенности и плохо поддается детерминированному описанию, поэтому особую значимость приобретают вероятностные и стохастические модели;
- сочетание различных механизмов геомиграции и структурных особенностей породы не исключает формирование путей быстрого транспорта радионуклидов, что требует корректировки моделей, исходящих из концепции сплошной среды





[rumynin@hgepro.ru](mailto:rumynin@hgepro.ru)

[annik3@ya.ru](mailto:annik3@ya.ru)

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

