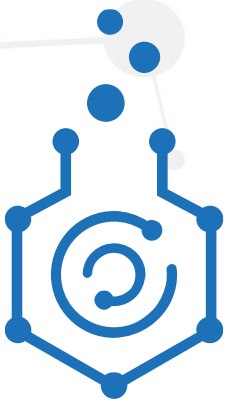




РАДОН  
РОСАТОМ

*V научно-практическая конференция «Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров»*



**Доклад на тему:**

**«Лабораторный цикл исследований перспективных бетонов как материалов инженерных барьеров безопасности для изоляции радионуклидов в условиях ПГЗРО»**

**Козлов П.П.<sup>1</sup>, Тюпина Е.А.<sup>1</sup>, Крупская В.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева), г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва, Россия*

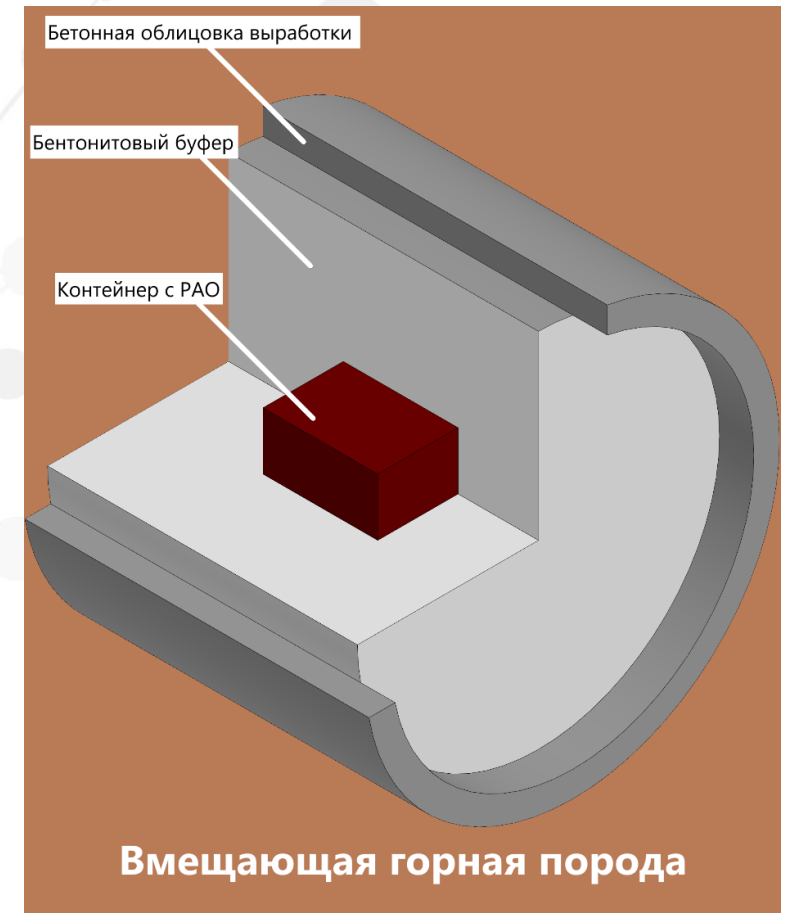
# Современный подход к захоронению РАО в глубинных геологических формациях



## Основные особенности глубинного захоронения РАО:

- Наиболее надежный способ окончательной изоляции радиоактивных отходов, в связи с чем считается единственным приемлемым методом захоронения РАО классов 1 и 2.
- Реализует принцип многобарьерной системы защиты окружающей среды, включающей совокупность естественных и искусственных барьеров безопасности.
- Основным звеном системы безопасности является естественный противомиграционный барьер – горная порода, являющаяся стабильной геологической формацией с высокими показателями водонепроницаемости и совместимости с формами РАО.
- Для создания искусственных барьеров безопасности используется цемент и бетон.

## Упрощенная схема одного из вариантов организации глубинного захоронения РАО

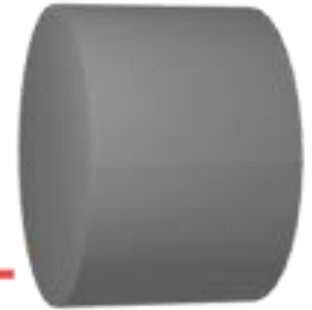


# Цемент и бетон как материалы инженерных барьеров безопасности в ПГЗРО



Цементная матрица для локализации САО

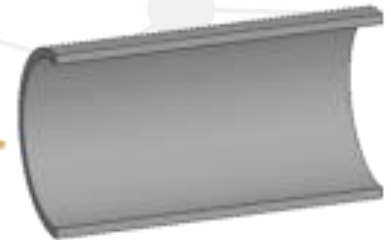
Бетонные заглушки/  
перегородки тоннелей/скважин,  
содержащих контейнеры с РАО



Бетонный контейнер,  
содержащий канистры/бочки с  
САО



Бетонная облицовка тоннелей/  
скважин, предназначенных для  
размещения контейнеров с РАО



Цементный буфер

# Этапы создания отечественного ПГЗРО в кристаллических породах Нижнеканского массива (НКМ)



**Фаза № 1** «Подготовительные работы по созданию ПИЛ». Длительность – до 5 лет. (2017–2021 гг.)

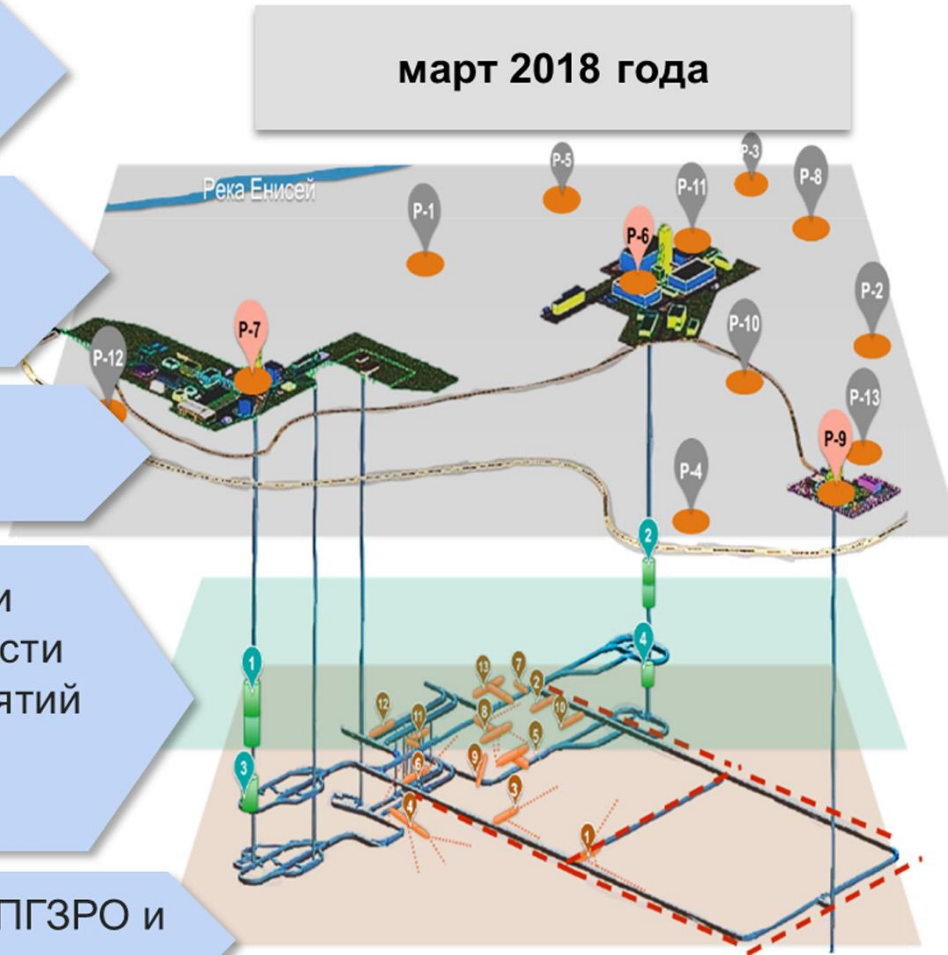
**Фаза № 2** «Сооружение демонстрационного центра и основных сооружений ПИЛ». Длительность – до 5 лет

**Фаза № 3** «Эксплуатация и развитие ПИЛ». Длительность – от 5 лет и более.

**Фаза № 4** «Принятие решения о возможности создания ПГЗРО. Лицензирование деятельности по сооружению ПГЗРО. Реализация мероприятий по сооружению 1-й очереди ПГЗРО». Длительность – от 5 лет и более.

**Фаза № 5** «Эксплуатация первой очереди ПГЗРО и ПИЛ». Длительность – от 30 лет и более.

**Фаза № 6** «Закрытие первой очереди ПГЗРО». Длительность – от 5 лет и более.



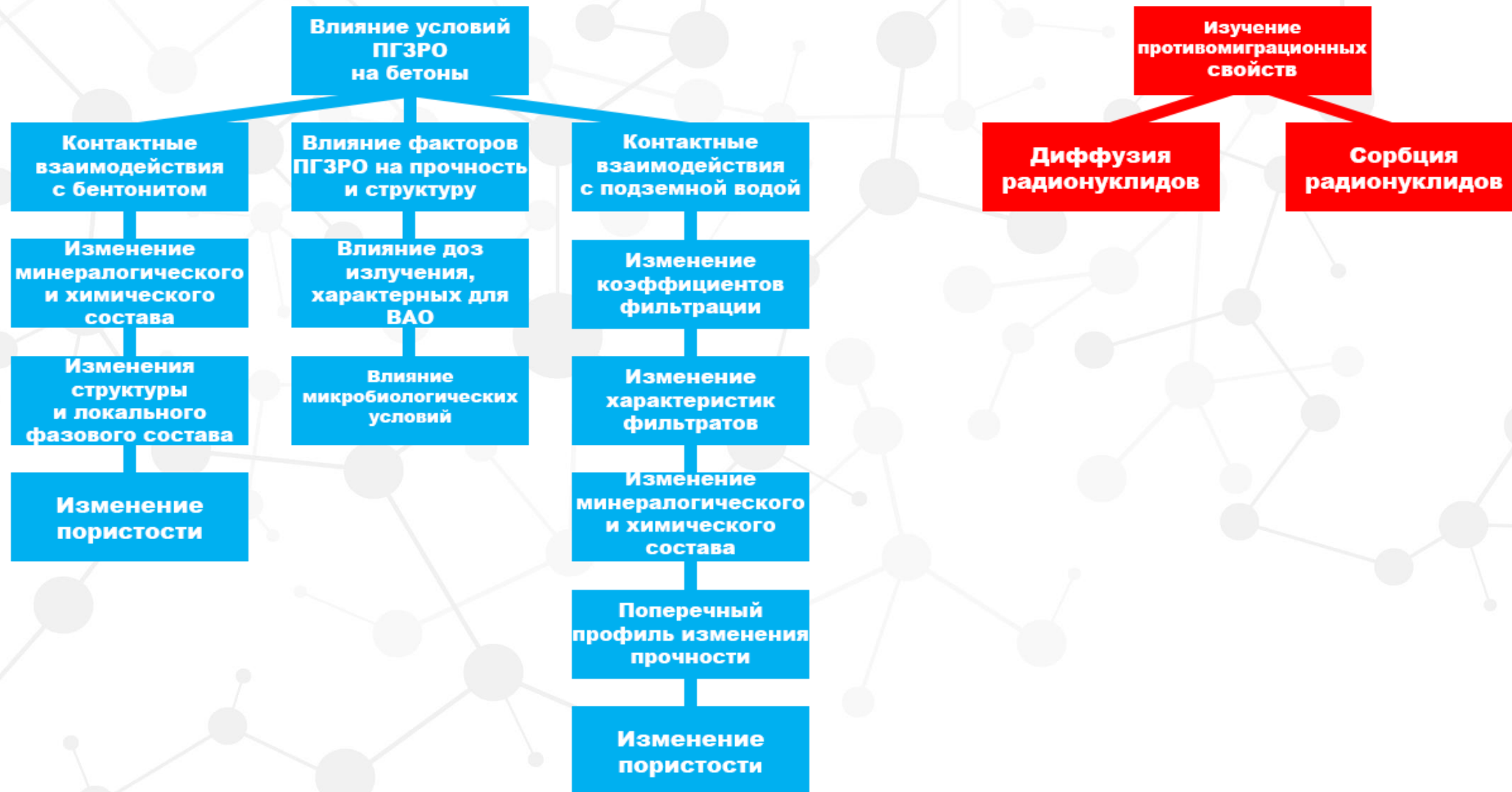
# Запланированные работы по изучению эволюции перспективных бетонных материалов в рамках «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО в ПГЗРО с оптимизацией его эксплуатационных параметров»

## Реализованный этап исследований (2022-2023 гг.)



# Запланированные работы по изучению эволюции перспективных бетонных материалов в рамках «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО в ПГЗРО с оптимизацией его эксплуатационных параметров»

## Последующие этапы работ (2024-2026 гг.)



# Цель и задачи работы

---



**Целью** данной работы является разработка лабораторного цикла исследований перспективных бетонов как материалов инженерных барьеров безопасности для изоляции радионуклидов в условиях ПГЗРО.

## Задачи:

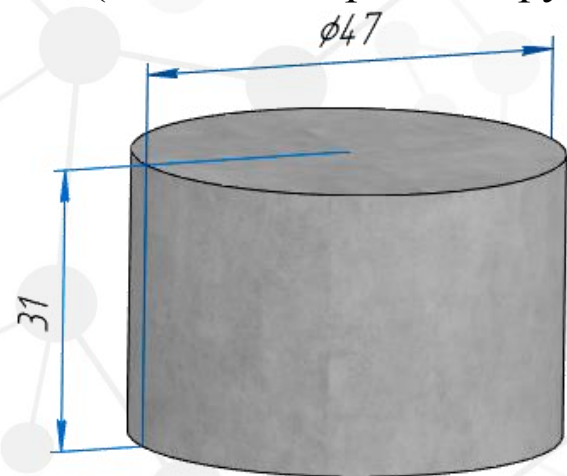
1. Разработать комплекс исследований для бетонных ИББ на основе методик, применяемых для изучения свойств цементов и бетонов как материалов общего назначения, таких как: тонкость помола и нормальная густота цемента, сроки схватывания и подвижность бетонной смеси, минеральный и химический состав, структура, пористость, паропроницаемость и пределы прочности при нагружении на сжатие и изгиб исследуемых образцов бетонов;
2. Для цементов и изготовленных на их основе бетонов, перспективных для использования в ПГЗРО, определить исходные данные: тонкость помола и нормальная густота цемента, сроки схватывания и растекаемость бетонной смеси, состав цементопорошков и отверженного бетона, а также структуру, пористость, паропроницаемость и прочность бетонных образцов.
3. На основе существующих технологических решений изготовить прототип экспериментальной установки, адаптированной для исследования фильтрации модельного раствора подземной воды Нижнеканского массива через бетонные образцы;
4. Произвести запуск фильтрационной установки и определить исходные значения коэффициентов фильтрации и параметров фильтратов бетонов, отмеченных перспективными для использования в ПГЗРО в литературных источниках;
5. С помощью предложенного комплекса методов провести оценку применимости перспективных бетонов в качестве материалов для создания инженерных барьеров безопасности в ПГЗРО.

# Объекты исследования



## Цементы:

- ЦЕМ I 52,5Н (ООО «СЛК Цемент»)
- ГЦ-35-50 (ЗАО «ЮжУралИнструмент»)



ЦЕМ I 52,5 Н  
+ SiO<sub>2</sub>



NRVB



ГЦ-50 + С-3  
+ SiO<sub>2</sub>

Образцы бетонов для фильтрационного эксперимента и их габаритные размеры

## Составы бетонных смесей с указанием источников и предполагаемых целей использования

### Бетон на основе обычного портландцемента (ОПЦ)

(Аналог раннего варианта низкощелочного бетона для изготовления заглушек в шведской концепции глубинного захоронения KBS-3V)

### Цементный буфер Nirex Reference Vault Backfill (NRVB)

(Буферный материал для закладки контейнеров с РАО класса 2 в ряде европейских концепций)

### Алюминатный бетон

(Бетон, выбранный для изготовления заглушек и заполнения камер захоронения в раннем варианте проекта ПГЗРО в Нижжнеканском массиве)



# Методы исследования и оборудование



Анализатор удельной площади поверхности и размеров пор Quadratorb SI/Kr



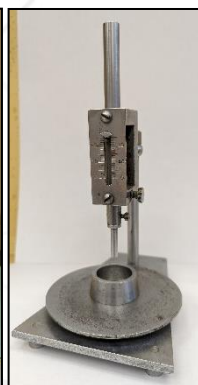
Рентгеновский дифрактометр Proto AXRD



Разрывная машина P-0,5



Ручной гидравлический пресс ПРГ-1-50



Прибор Вика



Кондуктометр-иономер АНИОН-4120



Конус КР-1 и столик с концентрическими окружностями



Рентген-флуоресцентный спектрометр Axios mAX



Сканирующий электронный микроскоп LEO1450VP



Прибор ПРГ-1



Компьютерный микротомограф SkyScan-1172.

# Методические подходы к определению коэффициента фильтрации



№ п.п.	1	2	3
Наименование	Ячейка фиксированного (постоянного) объема	Метод трехосного сжатия ГОСТ 12248-2010 п.5.3	Одометры без возможности бокового обжатия/деформации образца ГОСТ 25584
Распространенность	Основной подход во всех зарубежных исследованиях	Проектируется в адаптации к глинистым материалам Для определения $K_f$ используется редко	Комплекс «АСИС» производства ООО «НПП «Геотек»
Недостатки/ограничения	Отсутствие возможности нагружения образца; вероятность пристеночной фильтрации по границе контакта образца с ячейкой при высоких градиентах напора	Крайне высокая длительность эксперимента	Вероятность пристеночной фильтрации по границе контакта образца с ячейкой при высоких градиентах напора

# Эксперимент по фильтрации модельного раствора НКМ воды через бетонные образцы



Состав модельного раствора  
подземной воды НКМ

Компонент	Концентрация, мг/л
Cl <sup>-</sup>	36
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	15
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	18
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	79
Na <sup>+</sup>	32,6
K <sup>+</sup>	3,9
Mg <sup>2+</sup>	10,2
Ca <sup>2+</sup>	18,5



Внешний вид запущенной фильтрационной установки

# Определение тонкости помола и нормальной густоты цементов и сроков схватывания бетонов и подвижности используемых смесей



Удельная поверхность и нормальная густота цементов

Цемент	Удельная поверхность ( $S_{уд}$ ), $см^2/г$	Нормальная густота цементного теста
ЦЕМ 1 52,5Н	11410	0,328
ГЦ-35 50	5530	0,264
Средние значения	3000 - 8000	0,23 - 0,28

Сроки схватывания бетонов

Бетон	Начало схватывания, мин	Конец схватывания, мин
Бетон на основе ОПЦ	90	125
NRVB	80	145
Алюминатный бетон	45	125
Требования ГОСТ	Не менее 45 мин	Не более 12 ч

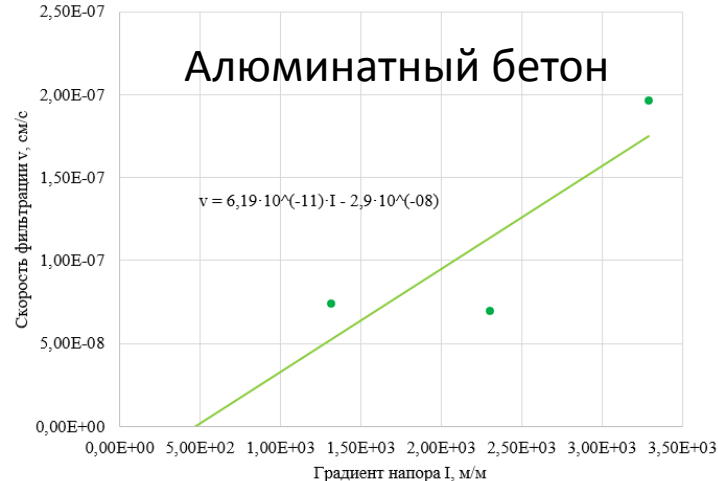
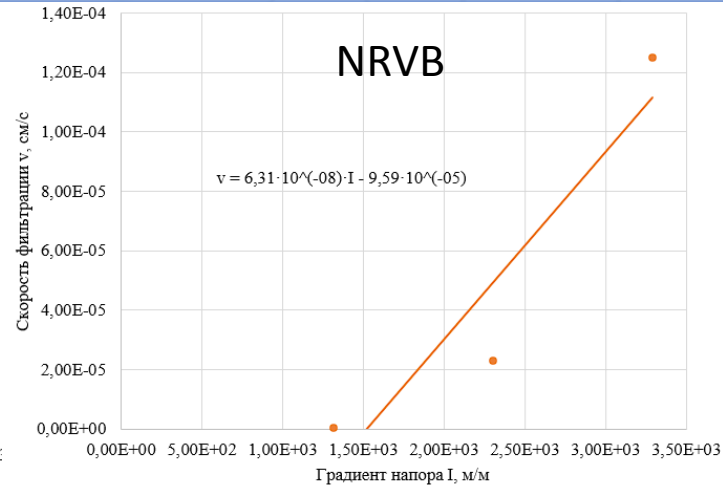
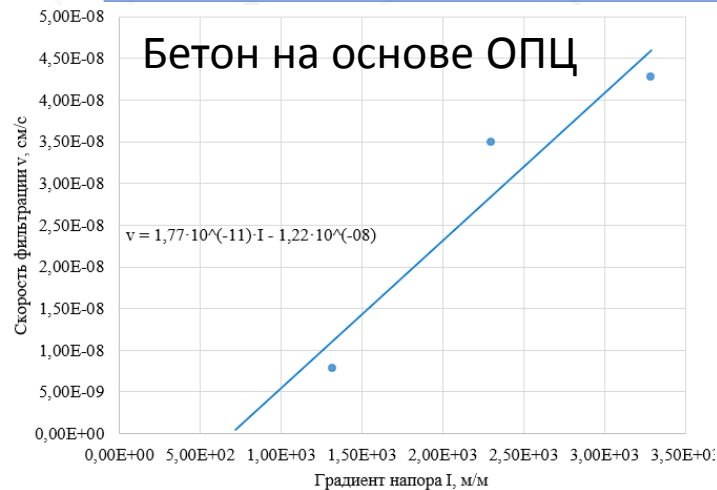
Растекаемость бетонных смесей

Бетон	Бетон на основе ОПЦ	NRVB	Алюминатный бетон
Растекаемость, мм	125	112,5	185

Подвижность бетонных смесей

Бетон	Бетон на основе ОПЦ	NRVB	Алюминатный бетон
Глубина погружения конуса, см	8,9	11,1	14,3
Марка подвижности по ГОСТ 28013-98	$P_{к3}$	$P_{к3}$	$P_{к4}$

# Исходные значения коэффициента фильтрации бетонных образцов и электрохимические параметры фильтратов



## Коэффициент фильтрации бетонных образцов

Бетон	$K_f$ , см/с	$K_{10}$ , м/сут
Бетон на основе ОПЦ	$1,77 \cdot 10^{-11}$	$1,08 \cdot 10^{-8}$
NRVB	$6,31 \cdot 10^{-8}$	$3,84 \cdot 10^{-5}$
Алюминатный бетон	$6,19 \cdot 10^{-11}$	$3,77 \cdot 10^{-8}$

## Коэффициент фильтрации горных пород<sup>1,2</sup>

Горная порода	$K_f$ , см/с
Гранитные пласты в ПИЛ Аспё (Швеция)	$10^{-8}$
Осадочные гнейсы (Финляндия)	$10^{-9}$
Цельные граниты (Швеция)	$10^{-10}$

Графики зависимостей скорости фильтрации через бетонные образцы от создаваемых градиентов напора

1 - Cheng H., Cvetcovic V. Äspö Hard Rock Laboratory. – 2006.

2 - Karro E., Lahermo P. Occurrence and chemical characteristics of groundwater in Precambrian bedrock in Finland //Special paper-geological survey of Finland. – 1999. – С. 85-96.

# Оценка газопроницаемости бетонных образцов



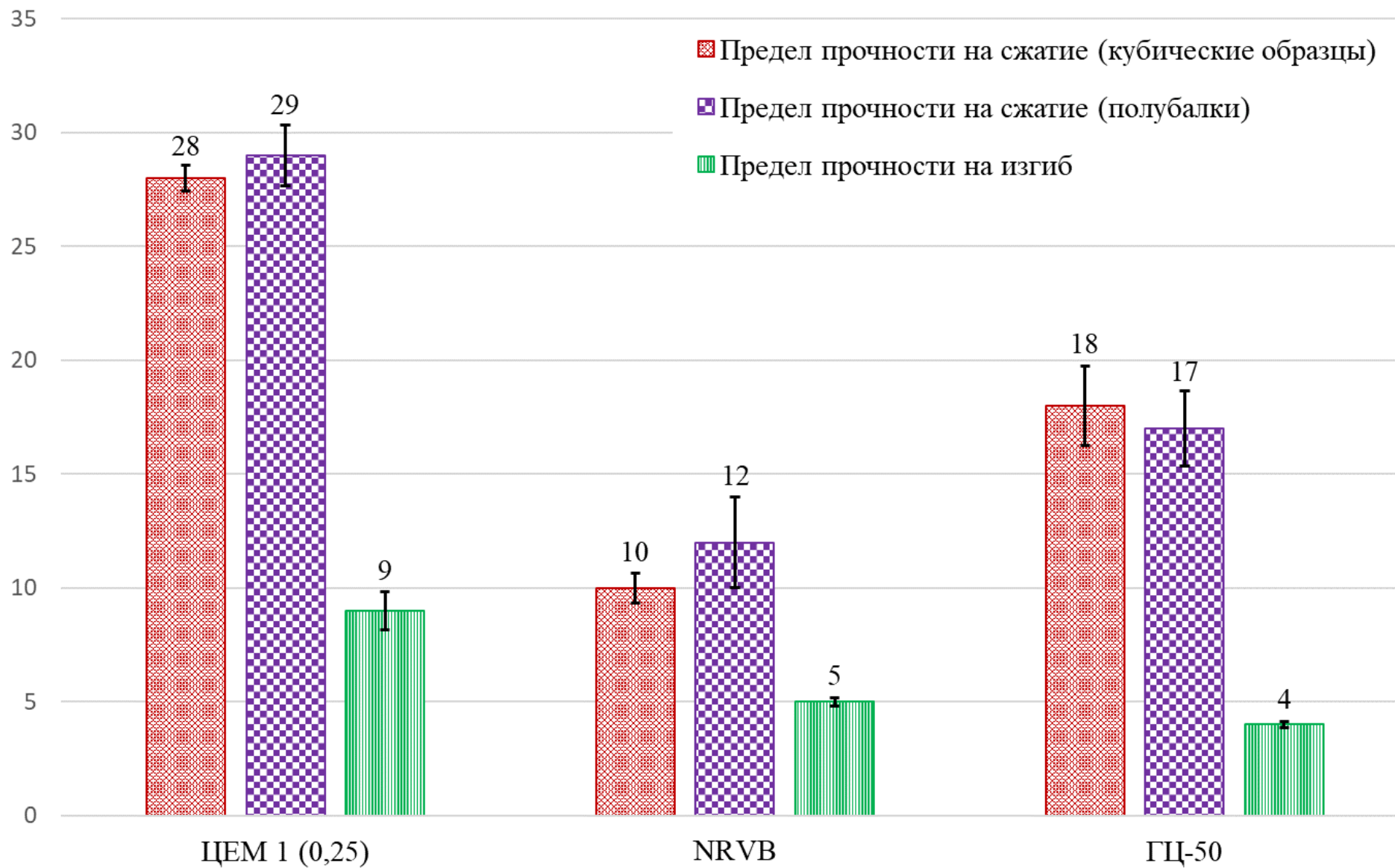
## Паропроницаемость исследуемых бетонов по методике ГОСТ 28575-90

Бетон	Паропроницаемость ( $\mu$ ), мг/(м·ч·Па)
Бетон на основе ОПЦ	0,18±0,02
NRVB	0,73±0,07
Алюминатный бетон	0,071±0,007

## Значения паропроницаемости, свойственные некоторым материалам<sup>1</sup>

Материал	Паропроницаемость ( $\mu$ ), мг/(м·ч·Па)
Железобетон	0,03
Керамзитобетон на кварцевом песке	0,075
Газо- и пенобетон	0,013 – 0,355

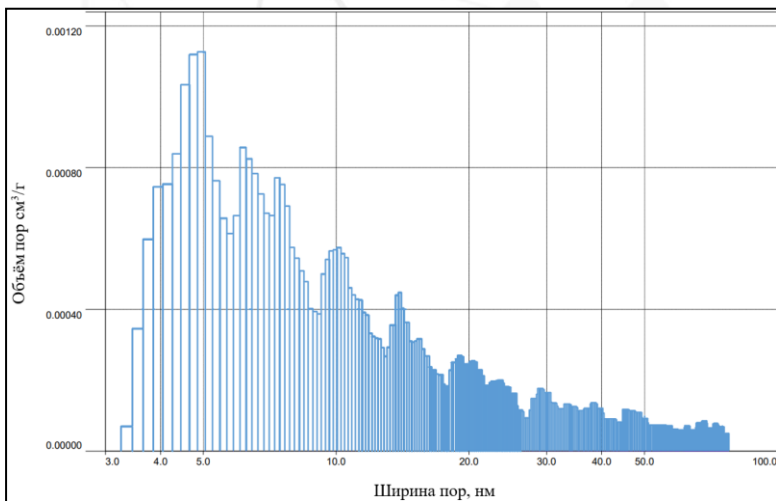
# Прочность бетонных образцов на сжатие и изгиб



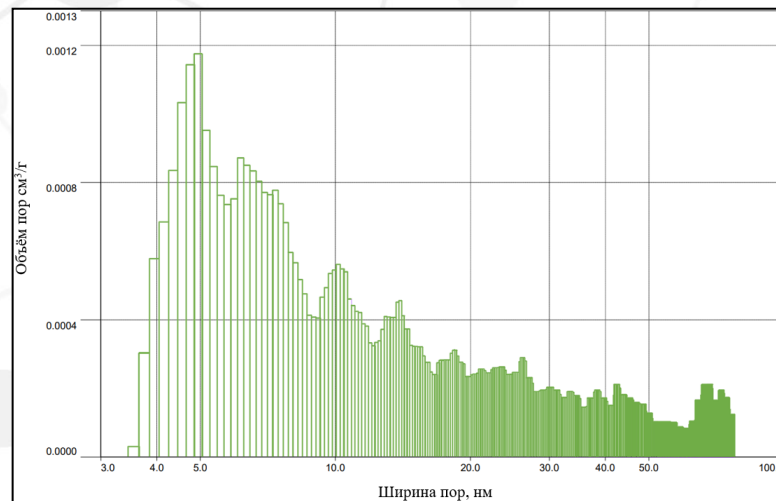
# Анализ микро- и мезопористости бетонных образцов методом низкотемпературной адсорбции азота



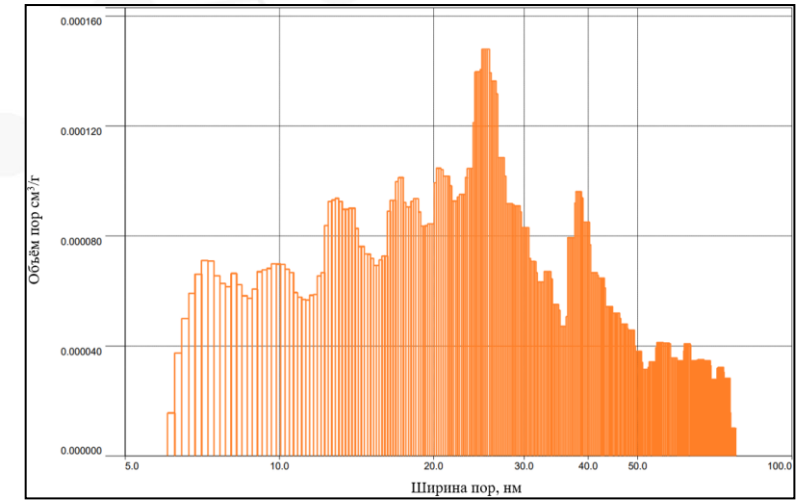
Метод	ВЕТ	DFT		t-метод Хэлси		
	Удельная площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г	Объем пор, см <sup>3</sup> /г	Средний размер пор, нм	Объем микропор, см <sup>3</sup> /г	Площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г	
					Микропор	Суммарная
<b>Бетон</b>						
<b>Бетон на основе ОПЦ</b>	27,585	0,068	4,728	0	0	27,585
<b>NRVB</b>	28,925	0,088	4,728	0	0	28,925
<b>Алюминатный бетон</b>	3,269	0,022	25,503	0	0	3,269



Распределение пор по размерам в образце бетона на основе ОПЦ



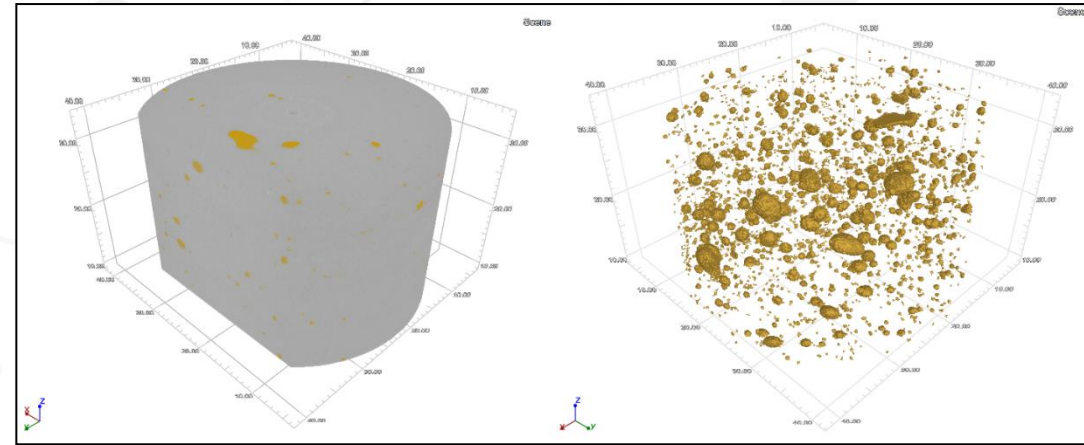
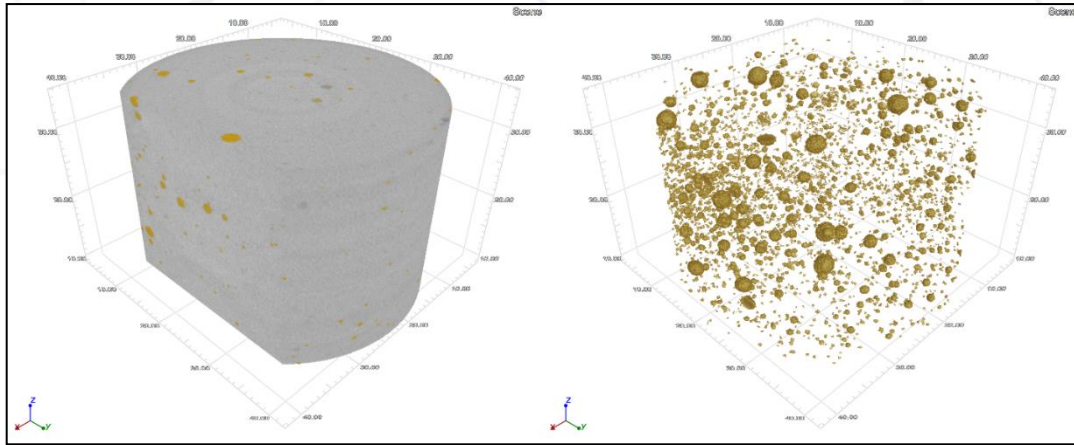
Распределение пор по размерам в образце NRVB



Распределение пор по размерам в образце алюминатного бетона

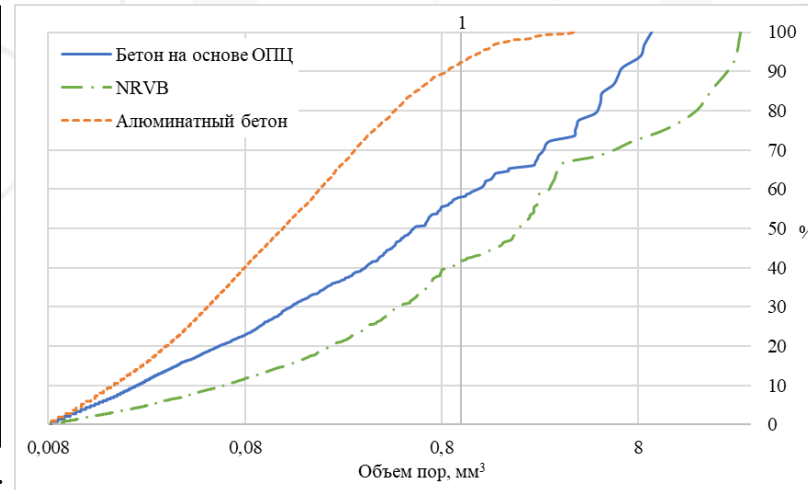
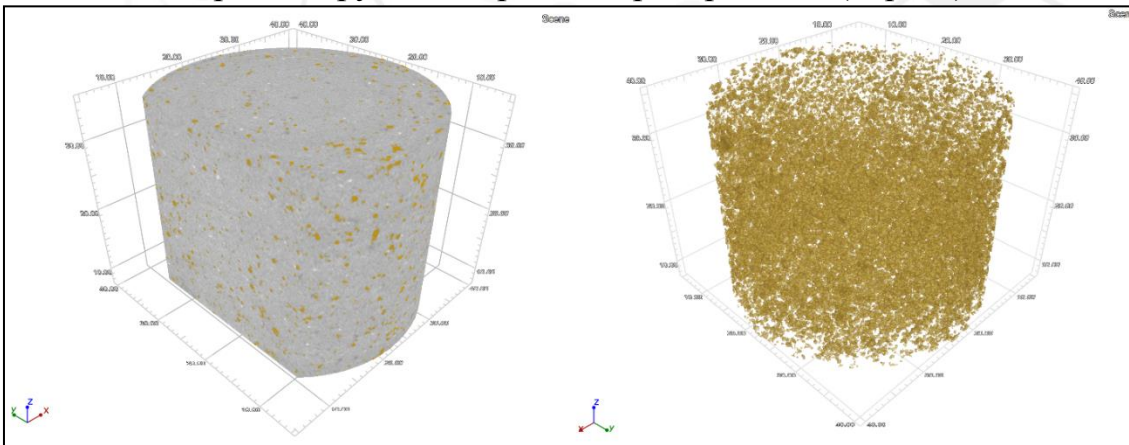


# Компьютерная микротомография бетонных образцов



Компьютерная микротомография образца **бетона на основе ОПЦ**:  
 графический результат расчета пористости (слева) и трехмерная  
 реконструкция порового пространства (справа)

Компьютерная микротомография образца **NRVB**: графический  
 результат расчета пористости (слева) и трехмерная реконструкция  
 порового пространства (справа)



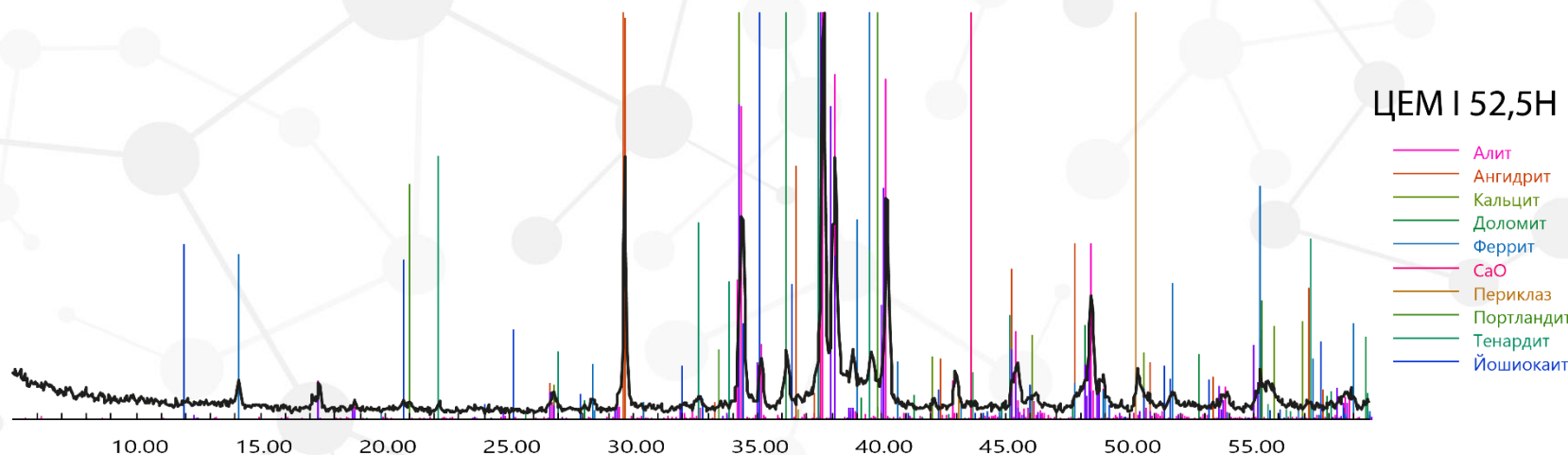
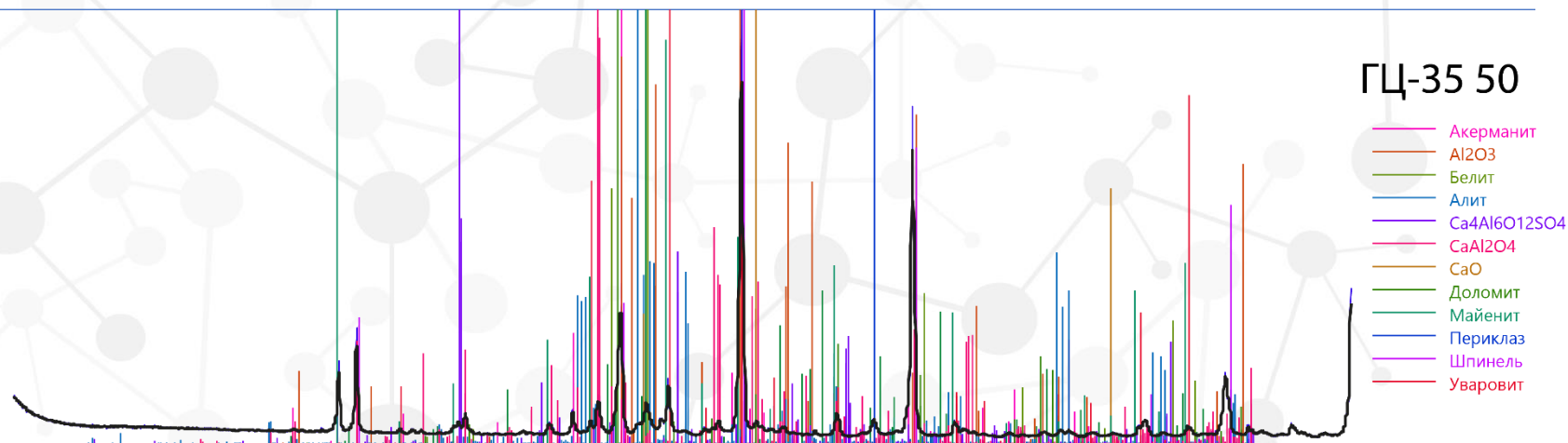
## Пористость бетонов

Бетон	Пористость, %
Бетон на основе ОПЦ	0,9
NRVB	1,2
Алюминатный бетон	3,9

Компьютерная микротомография образца **алюминатного бетона**:  
 графический результат расчета пористости (слева) и трехмерная  
 реконструкция порового пространства (справа)

Интегральные графики распределения пор в  
 бетонных образцах

# Минералогический и химический составы исходных цементных порошков

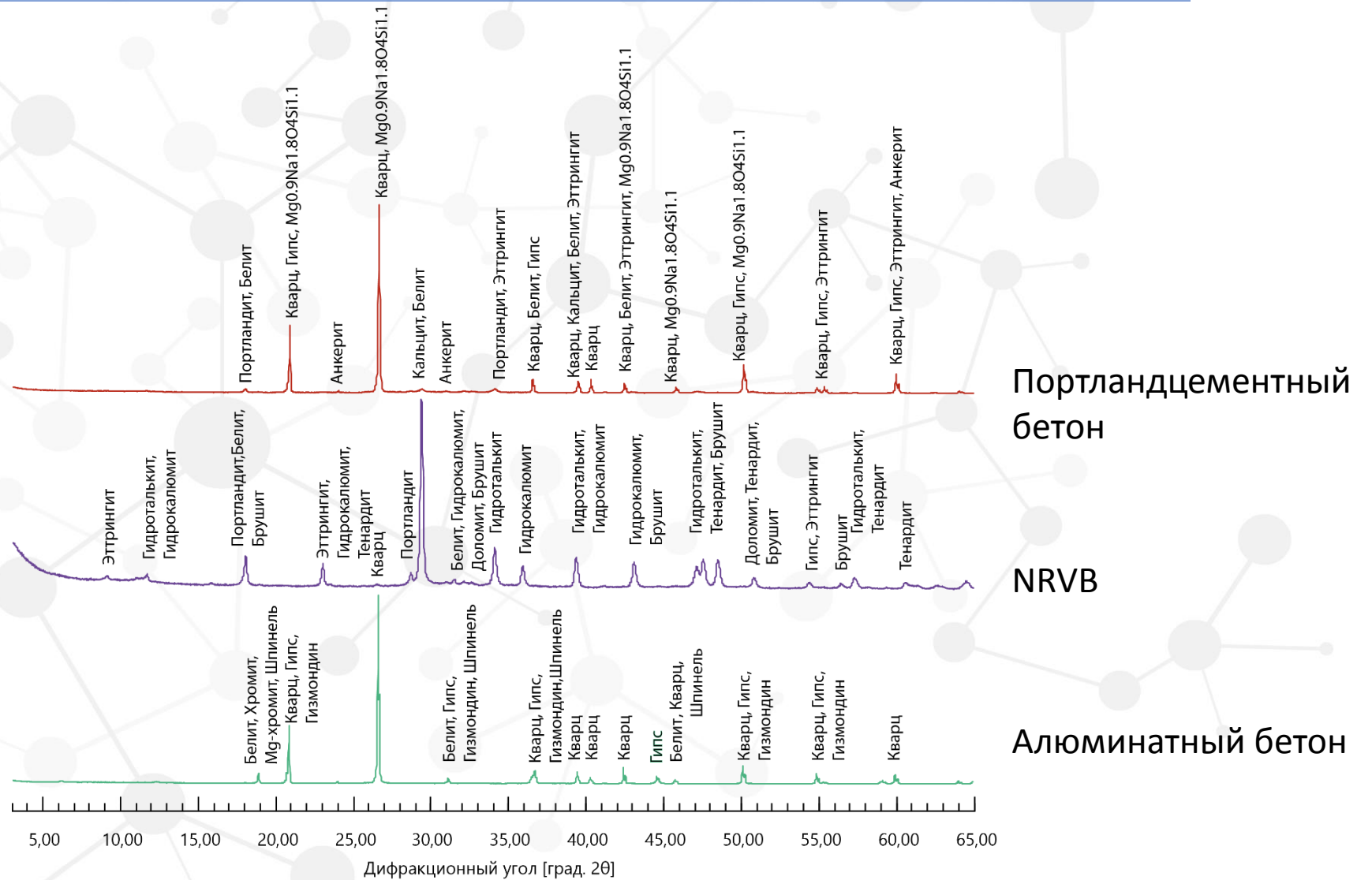


10.00 15.00 20.00 25.00 30.00 35.00 40.00 45.00 50.00 55.00

Дифракционный угол, °2θ

Идентификация фаз на дифрактограммах исходных цементных порошков

# Минералогический и химический составы бетонов



Идентификация фаз на дифрактограммах исходных бетонов

# Минералогический и химический составы исходных цементных порошков



Минералогический состав исходных цементных порошков Химический состав исходных цементных порошков

Компонент	Цемент	
	ЦЕМ 1 52,5Н	ГЦ-35 50
Акерманит ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ )	0	7
Алит ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )	60,6	1,8
Белит ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )	7	5,6
Глинозём ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	0	7,2
Гипс ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	7	0
$\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{SO}_4$	0	1,6
$\text{CaAl}_2\text{O}_4$	0	7,3
Кальцит ( $\text{CaCO}_3$ )	2	0
Оксид кальция ( $\text{CaO}$ )	0,7	1,1
Доломит ( $\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$ )	1,3	2,9
Четырехкальциевый алюмоферрит ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	15,5	0
Майенит ( $\text{Ca}_{12}\text{Al}_4\text{O}_{33}$ )	0	9,3
Периклаз ( $\text{MgO}$ )	2,6	3
Портландит ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )	0,5	0
Шпинель ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )	0	51,2
Тенардит ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	1,8	0
Уваровит ( $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ )	0	2
Йошикаит	1	0

Химические соединения	Цемент	
	ЦЕМ 1 52,5Н	ГЦ-35 50
Оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	4,64	54,08
Оксид бария ( $\text{BaO}$ )	0,03	<0,01
Оксид кальция ( $\text{CaO}$ )	60,16	16,29
Оксид хрома (III) ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )	0,02	8,69
Оксид железа (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3,27	0,3
Оксид калия ( $\text{K}_2\text{O}$ )	0,73	0,02
Оксид магния ( $\text{MgO}$ )	3,63	16,84
Оксид марганца ( $\text{MnO}$ )	0,06	0,081
Оксид натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,31	0,25
Оксид фосфора (V) ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	0,08	<0,01
Диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ )	21,75	2,89
Оксид стронция ( $\text{SrO}$ )	0,09	0,02
Диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ )	0,25	0,35
Диоксид циркония ( $\text{ZrO}_2$ )	0,02	0,02
Потери при прокаливании 1000 °С	1,65	<0,01

# Минералогический и химический составы бетонов



## Минералогический состав исходных бетонов

Компонент \ Бетон	Бетон на основе ОПЦ	NRVB	Алюминатный бетон
Глинозем ( $Al_2O_3$ )	0	0	2,6
Оксид хрома ( $Cr_2O_3$ )	0	0	0,8
$Na_2MgSiO_4$	1,6	0	0
$NaAlSiO_4$	1,5	0	0
Байерит ( $Al(OH)_3$ )	0	0	2,2
Брушит ( $Ca(PO_3OH) \cdot 2H_2O$ )	0	1,0	0
Белит ( $2CaO \cdot SiO_2$ )	3,9	1,8	0,1
Доломит ( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ )	0	1,03	0
Гидрокалумит ( $Ca_4Al_2(OH)_{12}(Cl, CO_3, OH)_2 \cdot 4H_2O$ )	0	0,96	0
Гидроталцит ( $CH_{24}Al_2Mg_6O_{23}$ )	0	3,7	0
Гипс ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )	0	0,6	0
Кальцит ( $CaCO_3$ )	3,5	63,0	0
Кварц ( $SiO_2$ )	85,7	0	82,1
Портландит ( $Ca(OH)_2$ )	3,8	24,6	0
Рингвудит ( $Mg, Fe^{2+})_2(SiO_4)$	0	0	11,5
Тенардит ( $Na_2SO_4$ )	0	0	0,7
Этtringит ( $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$ )	0	1,3	0
Югаваралит ( $Ca(Si_6Al_2)O_{16} \cdot 4H_2O$ )	0	2,0	0

## Химический состав бетонов

Химические соединения \ Бетон	Бетон на основе ОПЦ	NRVB	Алюминатный бетон
Оксид алюминия ( $Al_2O_3$ )	1,31	1,66	16,06
Оксид бария ( $BaO$ )	0	0,01	0
Оксид кальция ( $CaO$ )	18,09	48,25	5,41
Хром ( $Cr$ )	0	0,01	1,43
Оксид железа (III) ( $Fe_2O_3$ )	1,02	1,1	0,13
Оксид калия ( $K_2O$ )	0,16	0,06	0,03
Оксид магния ( $MgO$ )	0,94	1,37	5,13
Оксид марганца ( $MnO$ )	0,018	0,027	0,028
Оксид натрия ( $Na_2O$ )	0,05	0,02	0,07
Оксид фосфора (V) ( $P_2O_5$ )	0,02	0,05	0
Диоксид кремния ( $SiO_2$ )	70,31	7,19	67,22
Оксид серы (VI) ( $SO_3$ )	0,87	1,18	0
Стронций ( $Sr$ )	0,02	0,02	0
Диоксид титана ( $TiO_2$ )	0,07	0,08	0,11
Цирконий ( $Zr$ )	0,08	0	0,01
Потери при прокаливании 1000 °C	6,94	38,86	3,12

# Электрохимические параметры фильтратов модельного раствора, полученные для исследуемых бетонов



Время, нед	Среда	pH	Eh, мВ	t, °C
0	НКМ*	7,23	195	21,2
1	ОПЦ НКМ	9,82	145	22,8
2		10,06	57	21,3
3		11,05	34	18,3
4		11,54	-15	19,2
1		NRVB НКМ	12,26	-52
2	12,17		-37	20,4
3	12,43		-74	20,5
4	12,35		-27	19,2
1	АБ НКМ	11,50	7	16,9
2		8,41	148	22,3
3		11,10	7	17,2
4		10,97	24	19,2

\* проба модельного раствора подземной воды, отобранная перед началом эксперимента

# Химический состав фильтратов исследуемых бетонов



Вре мя, нед	Среда	Концентрация, моль/л									
		Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe	
0	НКМ	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$7,28 \cdot 10^{-4}$	$3,58 \cdot 10^{-4}$	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$6,89 \cdot 10^{-5}$	$6,88 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-4}$	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-6}$	
1	ЦЕМ I	$5,96 \cdot 10^{-3}$	$5,55 \cdot 10^{-6}$	$4,22 \cdot 10^{-4}$	$4,18 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$	$6,04 \cdot 10^{-4}$	$9,66 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-4}$	$1,59 \cdot 10^{-6}$	
2		$5,91 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-6}$	$3,56 \cdot 10^{-4}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-5}$	$3,14 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$8,74 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	
3		НКМ	$7,03 \cdot 10^{-3}$	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$3,90 \cdot 10^{-4}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$	$4,02 \cdot 10^{-5}$	$6,96 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$2,64 \cdot 10^{-4}$	$5,40 \cdot 10^{-7}$
4		$6,09 \cdot 10^{-3}$	$9,03 \cdot 10^{-7}$	$3,90 \cdot 10^{-4}$	$3,30 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$	$2,64 \cdot 10^{-4}$	$7,71 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$	
1	NRVB	$2,37 \cdot 10^{-3}$	$9,60 \cdot 10^{-7}$	$4,54 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$	$8,82 \cdot 10^{-6}$	$6,86 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$2,41 \cdot 10^{-3}$	$3,31 \cdot 10^{-6}$	
2		$1,45 \cdot 10^{-3}$	$4,33 \cdot 10^{-6}$	$5,28 \cdot 10^{-4}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$	<LOD	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$9,26 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$7,76 \cdot 10^{-7}$	
3		НКМ	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-6}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$5,84 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-3}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$
4		$1,37 \cdot 10^{-3}$	<LOD*	$2,58 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	<LOD	$7,10 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	<LOD	
1	АБ НКМ	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$2,76 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$	<LOD	<LOD	$3,40 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$2,02 \cdot 10^{-5}$	
2		$1,30 \cdot 10^{-3}$	$3,70 \cdot 10^{-8}$	$3,09 \cdot 10^{-4}$	$8,50 \cdot 10^{-4}$	<LOD	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$9,96 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	
3		$1,14 \cdot 10^{-3}$	$2,65 \cdot 10^{-7}$	$2,97 \cdot 10^{-4}$	$5,90 \cdot 10^{-4}$	<LOD	<LOD	$2,92 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$	
4		$1,13 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	<LOD	<LOD	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	



- 1. Исследования показали, что комплекс методов, предложенный для анализа бетонов, эффективен для прогнозирования их ключевых свойств, которые имеют важное значение при выборе бетонных смесей в качестве материалов инженерных барьеров безопасности в условиях пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО).**
- 2. Определение растекаемости бетонных смесей как способа оценки их подвижности оказалось нецелесообразным. Вместо этого, был использован метод погружения эталонного конуса прибора ПГР-1 для определения марки подвижности и потенциального использования исследуемых бетонных смесей при создании бетонных инженерных барьеров в ПГЗРО.**
- 3. Исходные данные для порошков цементов и перспективных бетонных составов были определены и проанализированы. Выяснилось, что тонкость помола цемента ЦЕМ I 52,5Н избыточна, что соответствует повышенной водопотребности. Для ГЦ-35 50 тонкость помола и водопотребность соответствуют нормам. Были изучены пористость, газопроницаемость и механическая прочность бетонных составов, а также характеристики фильтратов модельного раствора подземной воды. Эти данные служат отправной точкой для дальнейшего моделирования процессов эволюции перспективных бетонов в ПГЗРО.**





**4. Предложенная конструкция фильтрационной установки оказалась успешной для исследования процесса фильтрации модельного раствора подземной воды через бетонные образцы. В ходе работы удалось исключить пристеночную фильтрацию, которая считается основным недостатком существующих аналогов, и существенно снизить стоимость.**

**5. На основе результатов проведенных исследований можно сделать следующие предварительные выводы о применимости бетонных составов в условиях ПГЗРО:**

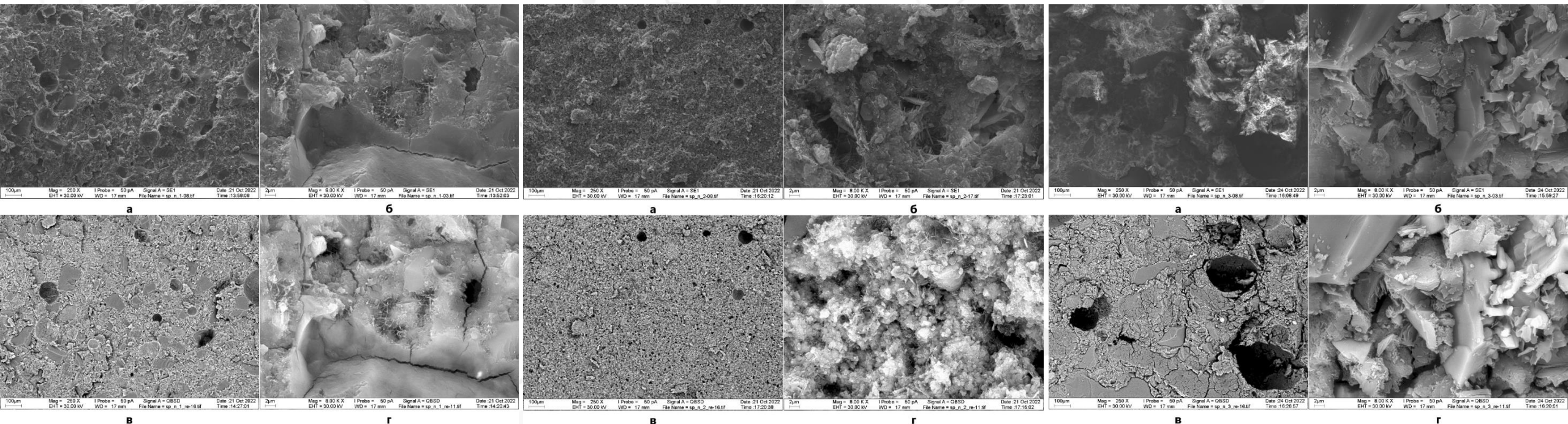
- Прочность на сжатие портландцементного бетона ( $29,07 \pm 1,33$  МПа) и алюминатного бетона ( $16,81 \pm 1,64$  МПа) превышает 10 МПа, что соответствует требованиям для материала бетонной заглушки в ПГЗРО.
- Газопроницаемость всех бетонов характеризуется высокими значениями, что поможет предотвратить образование избыточного давления в зоне захоронения.
- Коэффициенты фильтрации выбранных бетонов ( $10^{-11}$ - $10^{-8}$ ) сравнимы с проницаемостью гранитных горных пород ( $10^{-8}$ ), что важно для их применения при создании инженерных барьеров в ПГЗРО.
- Для бетона на основе ОПЦ требуется внести добавки для снижения рН продуктов взаимодействия с подземными водами, но в случае NRVB и алюминатного бетона значения данного параметра соответствуют ожиданиям.

Авторы работы выражают благодарность Морозову И.А. (ИГЕМ РАН), Тарарушкину Е.В. (НИУ ВШЭ), Горбунову В.А. (ФГУП «Радон»), Давиденко И.Б., доц., к.х.н. Меркушкину А.О. (РХТУ им. Д.И. Менделеева), с.н.с., к.г.-м.н. Чернову М.С. и проф., д.г.-м.н. Бычкову А.Ю. (МГУ им. М.В. Ломоносова) за помощь в проведении исследований.



**Спасибо за внимание!**

# Приложение 1: Анализ структуры бетонов с помощью сканирующей электронной микроскопии



Микрофотографии образца **бетона на основе ОПЦ**: а – 250-кратное увеличение (SE-детектор); б – 8000-кратное увеличение (SE-детектор); в – 250-кратное увеличение (QBSD-детектор); г – 8000-кратное увеличение (QBSD-детектор)

Микрофотографии образца **NRVB**: а – 250-кратное увеличение (SE-детектор); б – 8000-кратное увеличение (SE-детектор); в – 250-кратное увеличение (QBSD-детектор); г – 8000-кратное увеличение (QBSD-детектор)

Микрофотографии образца **Алюминатного бетона**: а – 250-кратное увеличение (SE-детектор); б – 8000-кратное увеличение (SE-детектор); в – 250-кратное увеличение (QBSD-детектор); г – 8000-кратное увеличение (QBSD-детектор)