

The background of the slide is a grayscale scanning electron microscope (SEM) image showing the intricate, porous, and fibrous structure of bentonite. The structure consists of interconnected, thin, wavy layers that form a complex, honeycomb-like network with numerous small, irregular voids and channels. The overall appearance is that of a highly porous, layered material.

**Влияние термохимического
воздействия на преобразования состава,
строения и свойств бентонитов**

В.В. Крупская^{1,2}, С.В. Закусин^{1,2}, И.А. Морозов¹, Е.А. Тюпина³

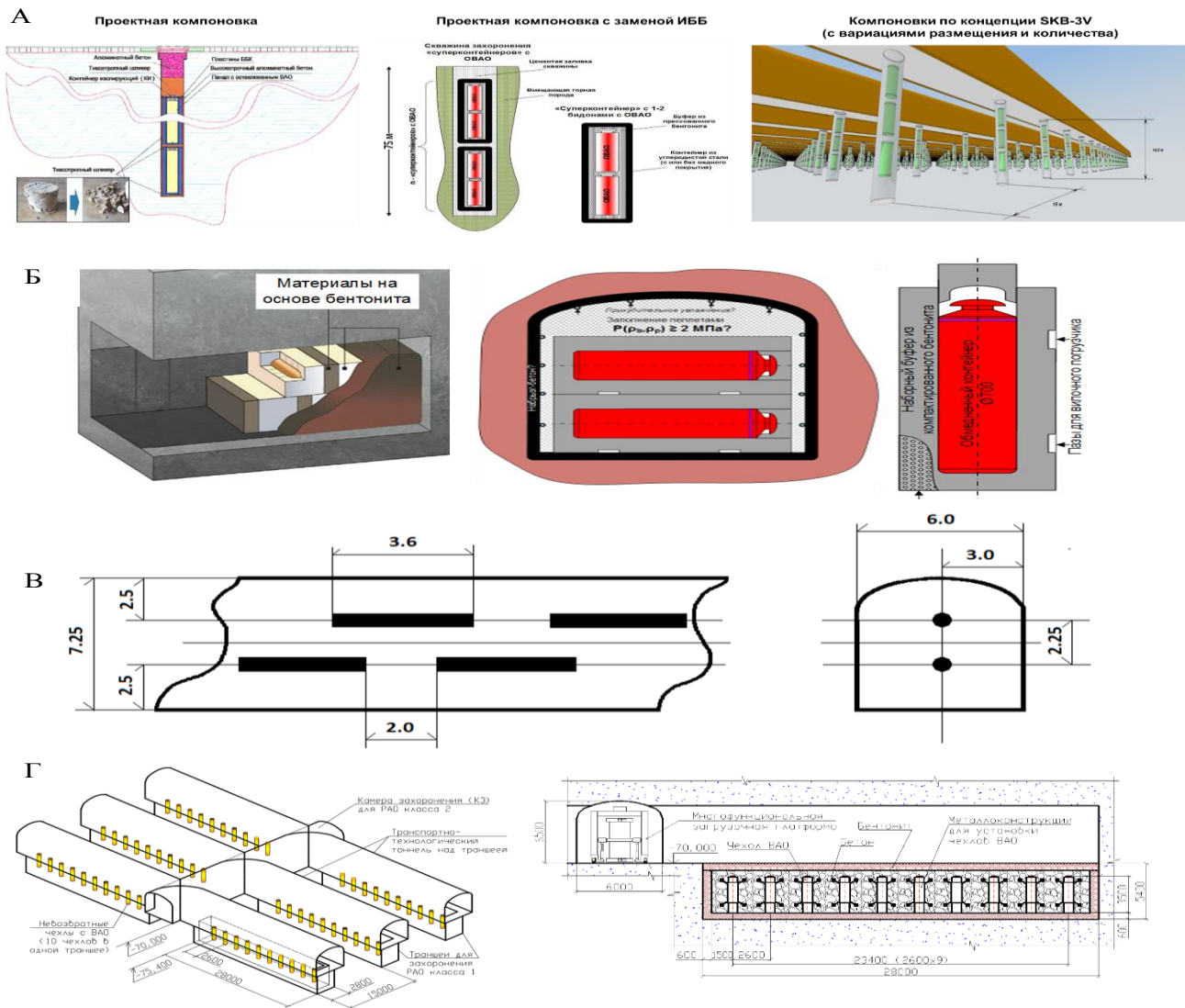
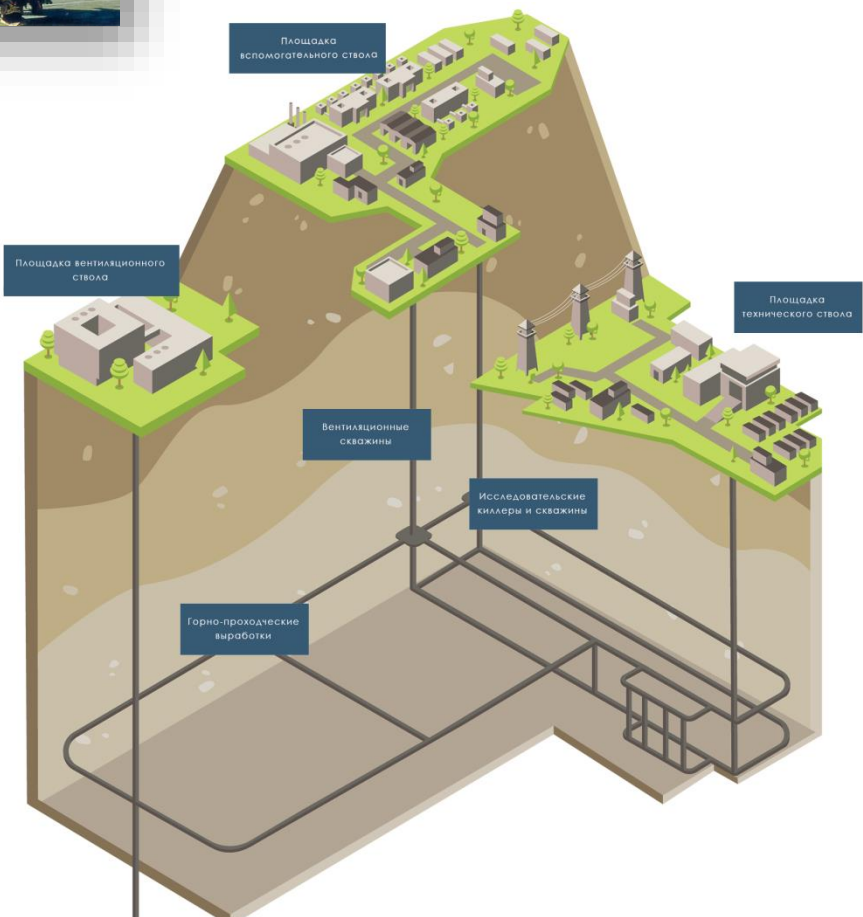
1 – ИГЕМ РАН, 2 – МГУ им. М.В. Ломоносова, 3 – РХТУ им. Д.И. Менделеева

2023



Захоронение РАО в кристаллическом массиве на участке Енисейский и создание подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ)

Exploratory Rock Laboratory In Krasnoyarsk region



ERLIK (Эрлик) – король подземного мира в тюркской мифологии

Exploratory Rock Laboratory In Krasnoyarsk region

В результате последовательного анализа отобраны 3 типа перспективных концепций:

- **Вариант 1 - захоронение в скважинах**, когда пеналы с РАО размещаются в коротких вертикальных тупиковых скважинах

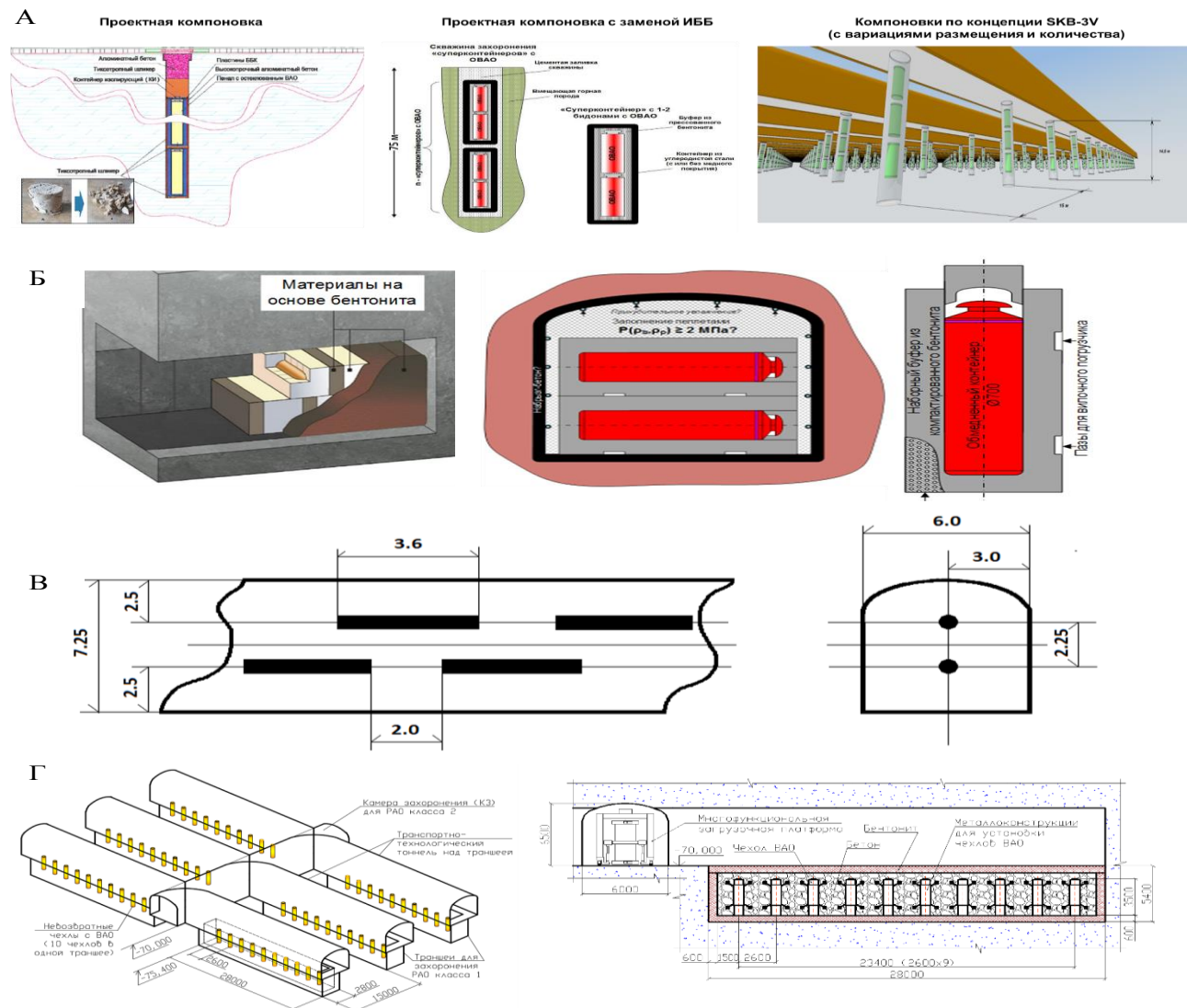
(наиболее проработанный с точки зрения обоснования вариант, основной минус – небольшой объем захораниваемых РАО)

- **Вариант 2 - захоронение в траншеях**, когда пеналы с РАО размещаются в углублении в полу тоннеля

(большой объем захоронения, чем в варианте 1, РАО класса 2 захораниваются как в проекте, необходима проработка вопроса по ИББ)

- **Вариант 3 - захоронение в выработках (тоннелях)**, когда пеналы с РАО размещаются непосредственно в тоннеле

(наиболее благоприятный по объему захоронения АФС и безопасности, но конструктивно сложнее, РАО класса 2 размещаются или совместно с РАО класса 1 или в отдельных выработках)



1

- Преобразование бентонитов в модельных условиях ПГЗРО

2

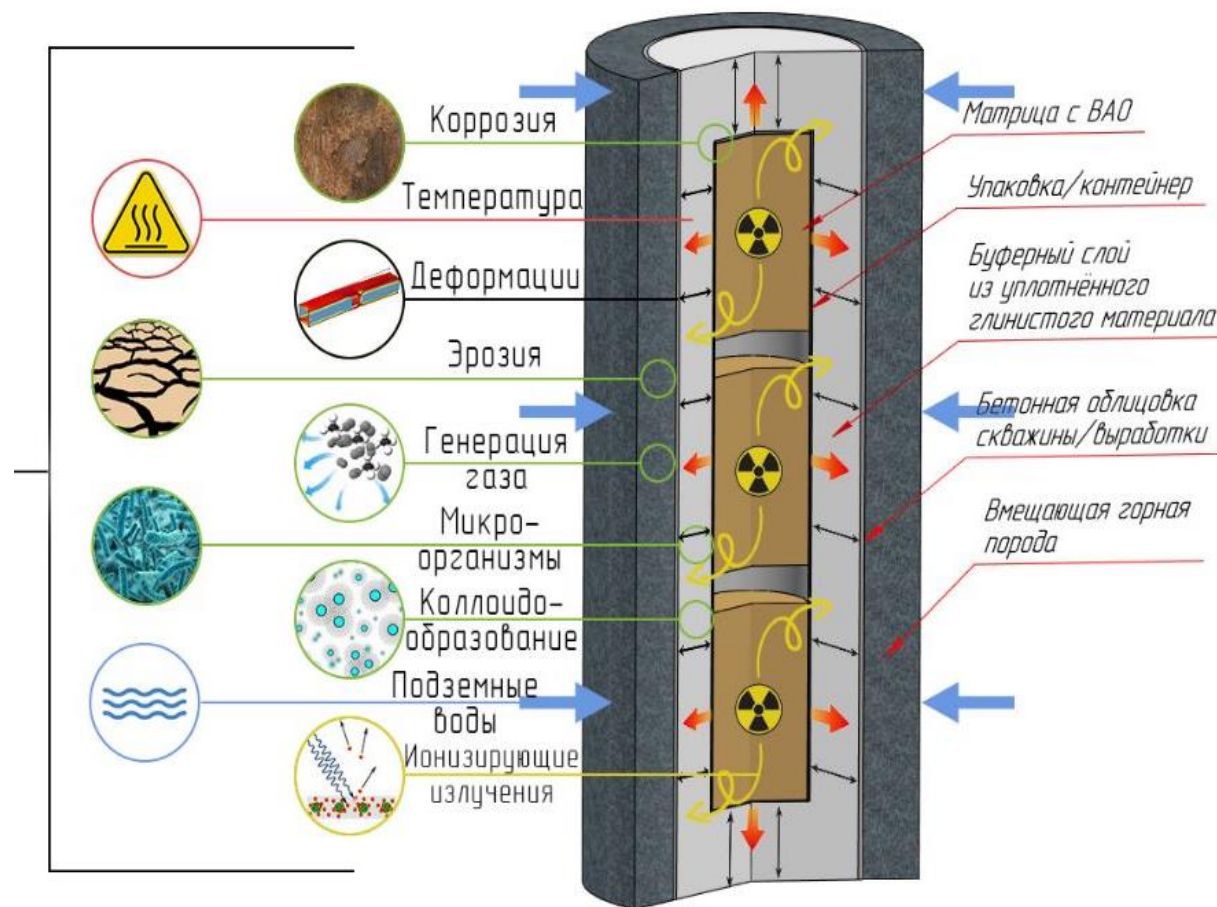
- Контактные взаимодействия порода-бентонит

3

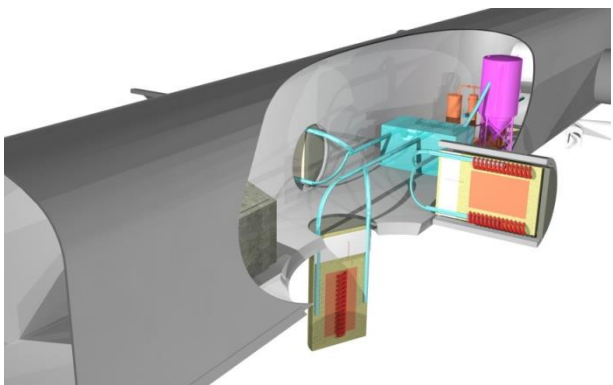
- Контактные взаимодействия металл-бентонит

- определение функций безопасности
- проведение сравнительного анализа изоляционных, физико-механических и других свойств глинистых материалов
- исследование эволюции состава и свойств (изоляционных, физико-механических, теплофизических и др.) материалов буферной зоны под влиянием внешних воздействий
- проведение аналитических и модельных расчетов для определения требований к свойствам материалов и изделий для буферной зоны;
- изучение технологических возможностей промышленного производства изделий с требуемыми свойствами различной формы и плотности

Особенности, события, процессы



Полномасштабные эксперименты в ПИЛ ERLIK

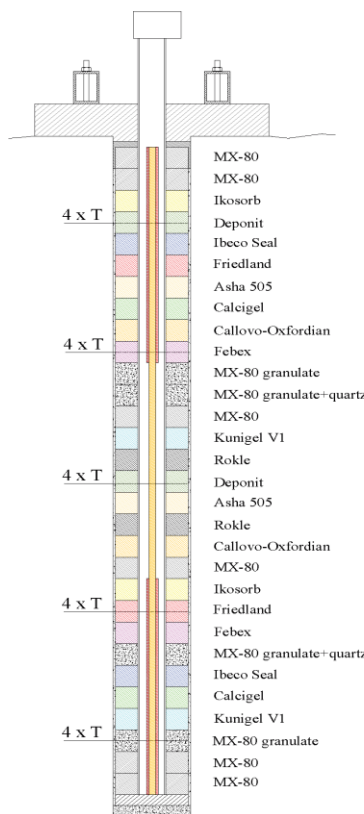


- Эволюция системы инженерных барьеров в условиях ПГЗРО
- ТермоЭволюция инженерных барьеров буфера – eThermoEvolution
- Граничные взаимодействия материалов барьеров
- Эволюция системы материалов обратного заполнения туннелей и заглушек
- Прогноз изменения свойств материалов ИББ

Изучение потенциальных изменений состава, строения и свойств глинистых материалов ИББ при эксплуатации ПГХРО и влияние этих изменений на обеспечение безопасности захоронения

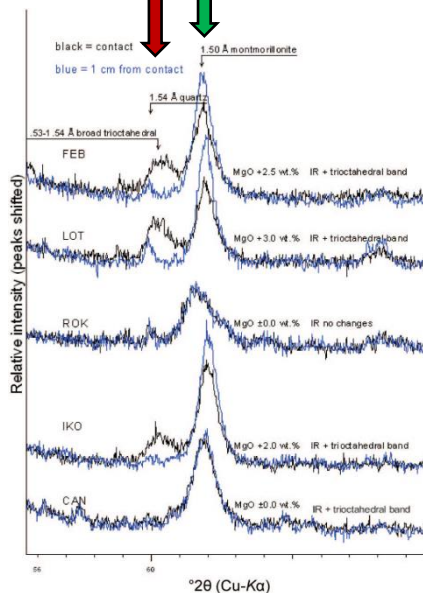
Полномасштабные эксперименты в ПИЛ Äspö (Sweden)

Alternative Buffer Material (ABM) project



135°C, Fe-канистра

tri-сметит (сапонит) di-сметит (монтмориллонит)



Prototype Repository in situ experiment (PR)

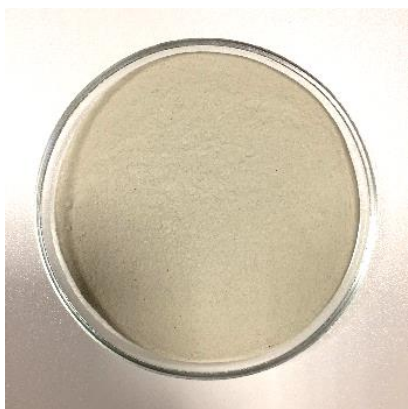
85°C, Cu-канистра

Не отмечено образование tri-сметитов

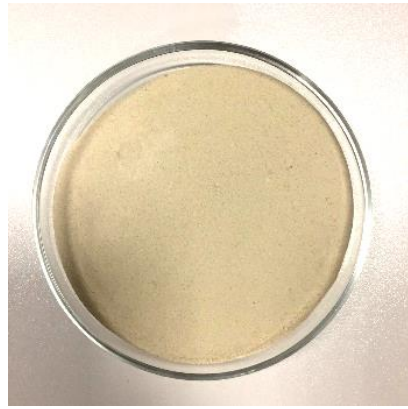


ABM - Kaufhold, S., Dohrmann, R., Olsson, S., Sellin, P., 2013. Clay Miner. 48, 215–233.
PR - Dohrmann, R., Kaufhold, S., 2014, Clays Clay Miner. 62, 357–373.

Порошки бентонитов из промышленных месторождений



*10^й Хутор
(Хакассия)*



*Таганское
(Казахстан)*



*Зырянское
(Курганский район)*



*Даш-Салахлинское
(Азербайджан)*

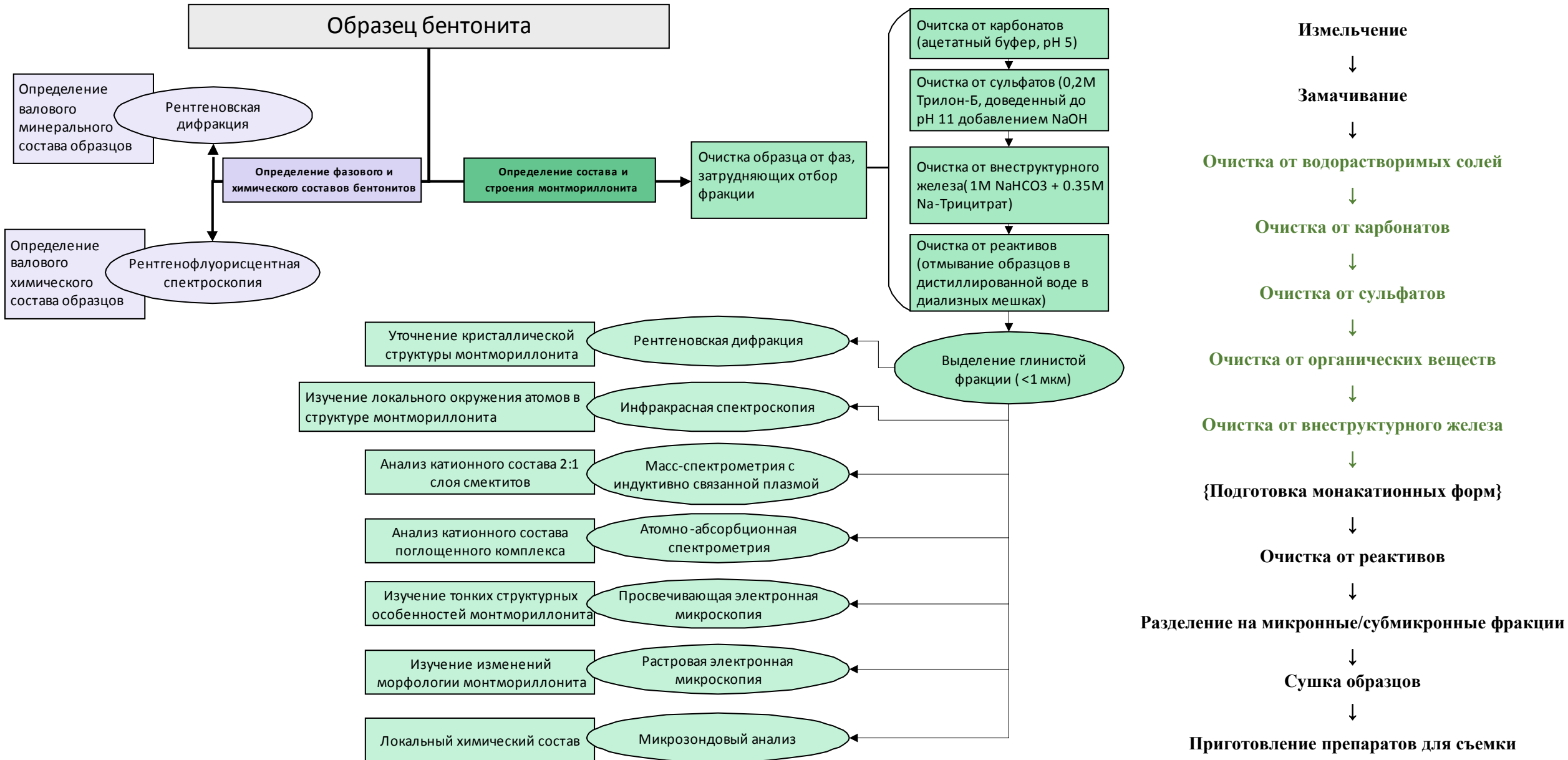




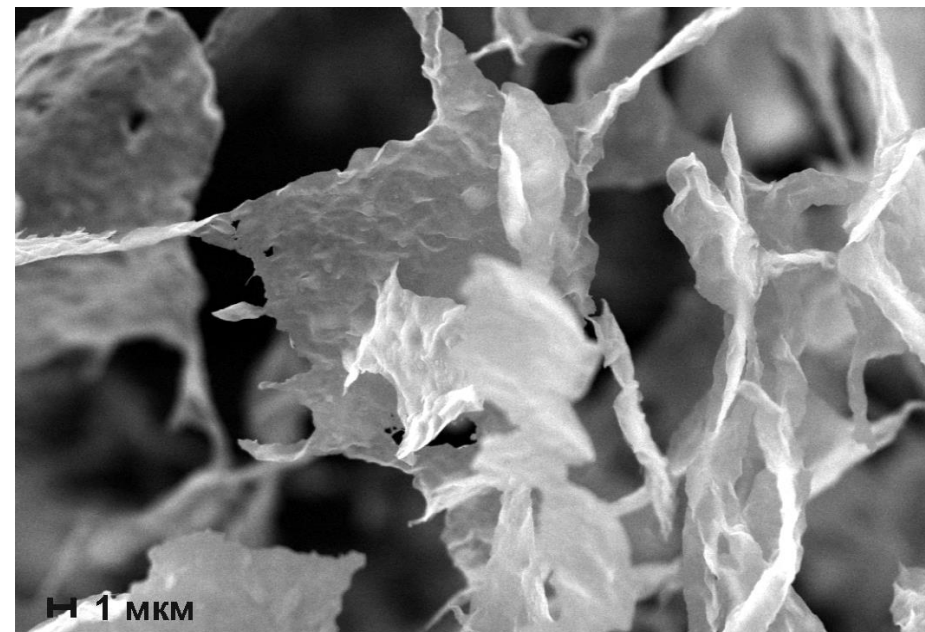
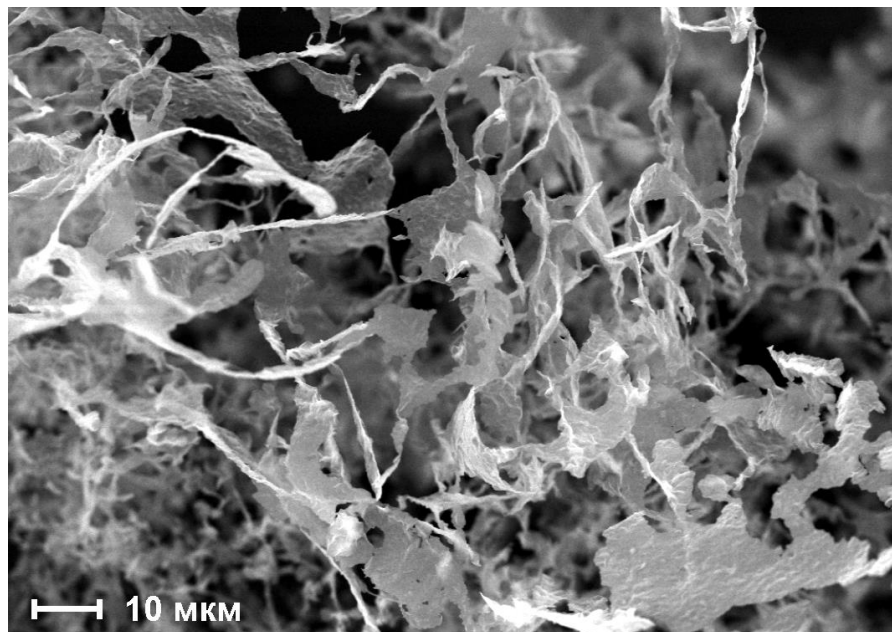
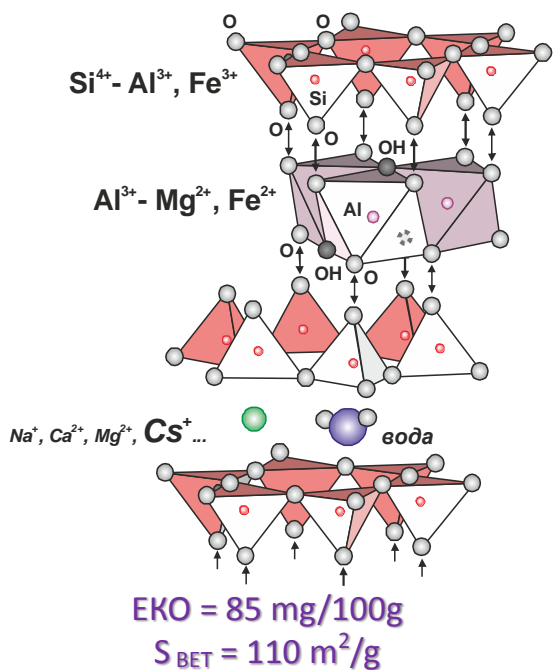
Эксперименты по эволюции материалов ИББ в модельных условиях ПГЗРО

	Эксперимент №1	Эксперимент №2	Эксперимент №3	Эксперимент №4	Эксперимент №5
Цель эксперимента	Преобразования в условиях присутствия щелочей при повышенной температуре	Преобразования в модельных условиях ПГЗРО в условиях воды после выщелачивания цементных матриц	Преобразования в модельных условиях ПГЗРО в условиях воды после выщелачивания алюмофосфатных матриц	Преобразование бентонита на контакте со сталью и коррозия стали в модельных условиях	Преобразование материала заполнения трещин и пор в модельных условиях в присутствии бентонита
Материал бентонита	порошок	порошок	порошок	компактиро-ванный, $\rho - 1.55 \text{ г/см}^3$	порошок
Граничный материал ИББ	нет	Образцы бетона в виде цилиндров 10*10 мм	Порошок алюмофосфатного стекла	образцы стали СТ3 в виде плоских таблеток 3*10 мм	Образцы кернов долеритов и гнейсов
Раствор	Модельная вода; КОН, NaOH	Модельная вода; После выщелачивания	Модельная вода; После выщелачивания	Модельная вода	Модельная вода
Соотношение Тв:Ж	1:6	1:6, 1:5	1:5	1:1	1:4
Длительность, месяц	1, 3, 6, 12, 24	1, 3, 6	1, 3, 6	4-5, до окончания газогенерации	4-5, до окончания газогенерации
Температура, °С	90	90	90	90, 120 и 150	90, 120 и 150
Тип сосуда	фторопластовые стаканы	фторопластовые стаканы	фторопластовые стаканы	стальные герметичные сосуды с тефлоновыми вкладышами	стальные герметичные сосуды с тефлоновыми вкладышами
pH раствора	3, 7, 10	7	7	7	7
Доп. условия	нет	нет	нет	измерение давление образовавшихся газов и их состав	измерение давление образовавшихся газов и их состав
Место проведения	ИГЕМ РАН	ИГЕМ РАН	ИГЕМ РАН	GRS, Германия (проект MUSE)	GRS, Германия (проект MUSE)

Системные подходы при обращении с образцами глин



Экспериментальные исследования стабильности смектитов в кислых условиях



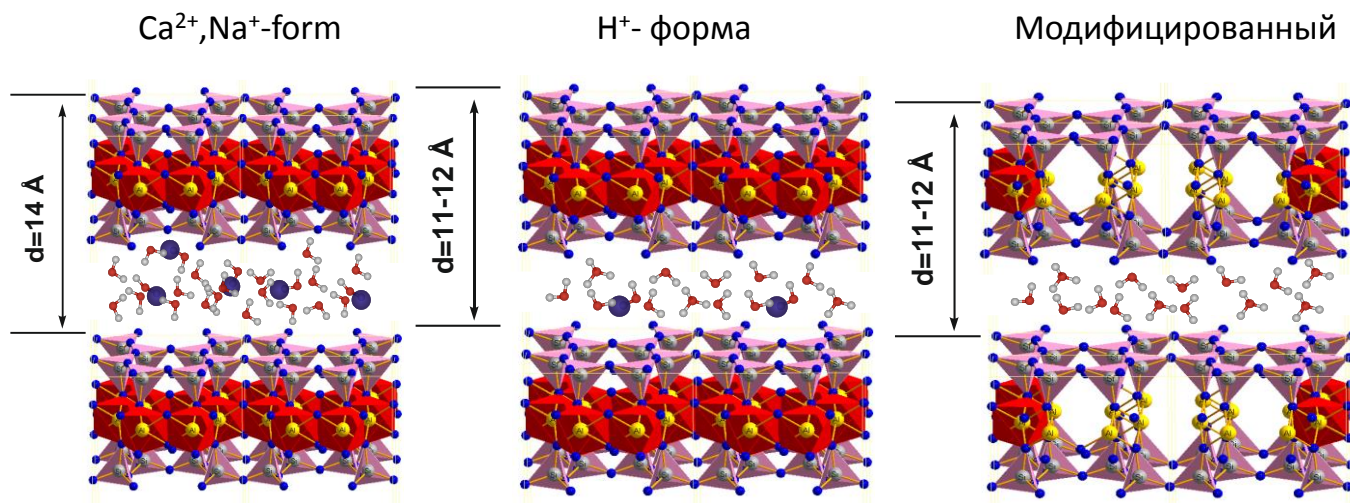
Растворы – 0.125М-14М HNO_3

Температура = 20, 90°C

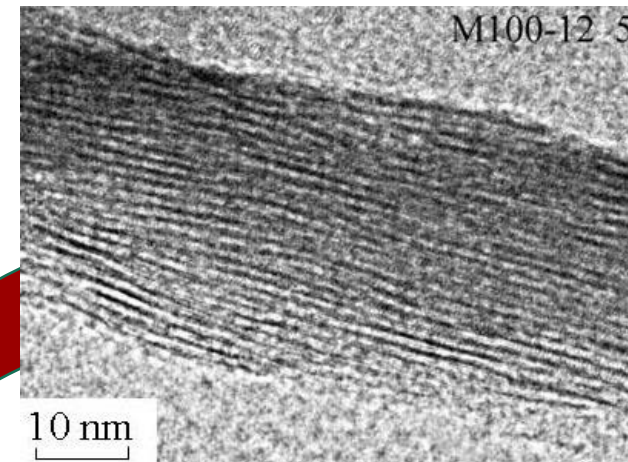
Время - 10, 20, 30, 40, 60 мин, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 36, 108 часов, 1, 3, 12 месяцев

Адсорбция - Cs, Sr, ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{233}U , ^{241}Am

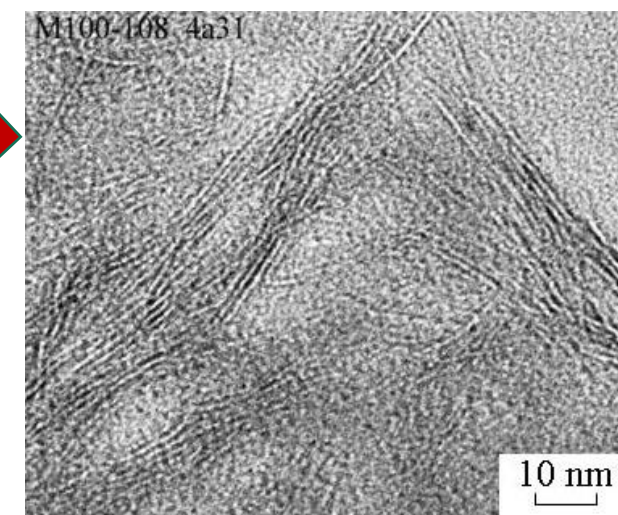
Экспериментальные исследования стабильности смектитов в кислых условиях



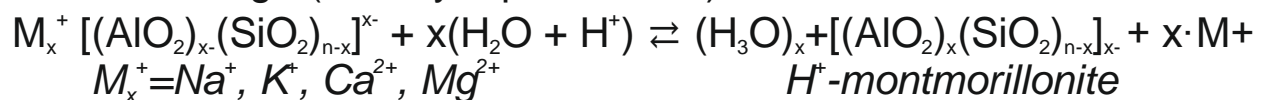
Природный бентонит



Кисотно-модифицированный



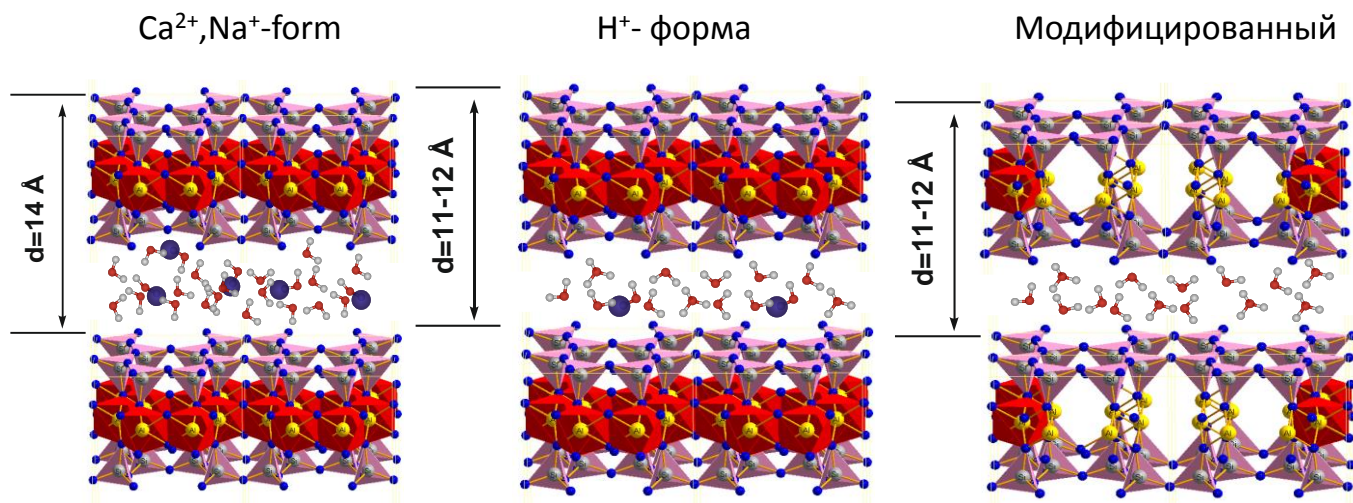
1. Cation exchange (interlayer protonation)



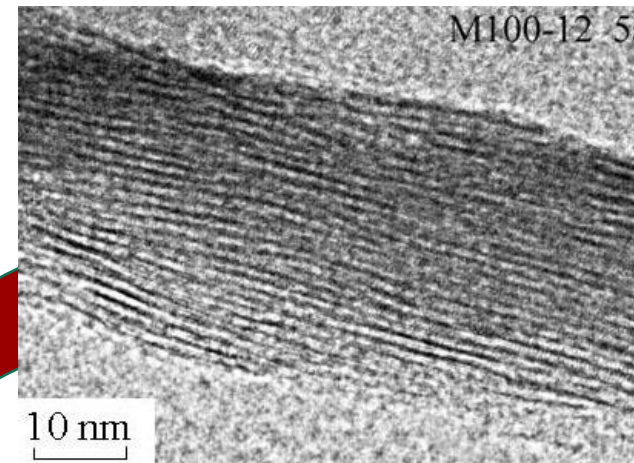
2. Cation leaching: $[(AlOOH)_x(SiO_2)_{n-x}]^0 + 3x H^+ \rightleftharpoons [(H_4O_2)_x(SiO_2)_{n-x}]^0 + x Al^{3+}$

3. Anion exchange: $2=AlOH + H_2SO_4 \rightleftharpoons (=Al)_2SO_4 + H_2O$

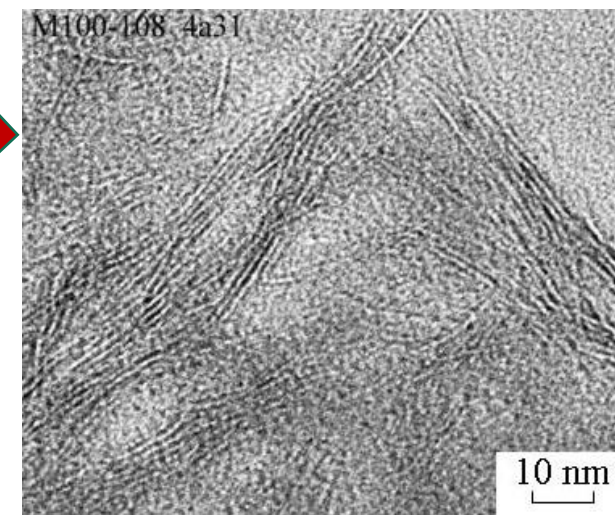
Экспериментальные исследования стабильности смектитов в кислых условиях



Природный бентонит



Кисотно-модифицированный



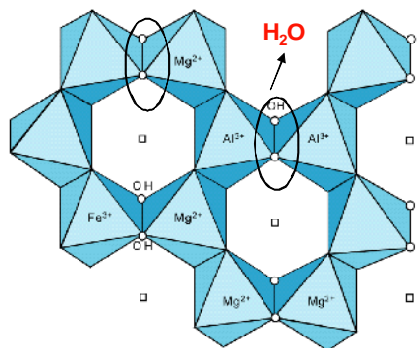
Изменение поверхностных свойств при термохимической обработке

Образец	Толщина частиц, нм $h_{(001)}$ (ОКР)	Количество слоев, N	Площадь поверхности, $S_{\text{ВЕТ}}$ (м ² /г)	Объем пор, V_{Σ} (см ³ /г)	Емкость катионного обмена, ЕКО, (мг-экв/100г)
Природный	8.2	6	67	0,08	86
12 часов	7.0	5	110	0,11	58
36 часов	7.0	5	191	0,19	56
102 часов	5.5	4	301	0,35	40

Преобразование глинистых минералов группы смектита при термохимическом воздействии – кислые условия

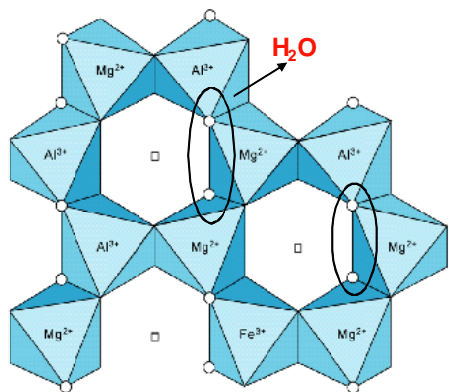
Менее стабильны в кислой среде

trans-вакантный



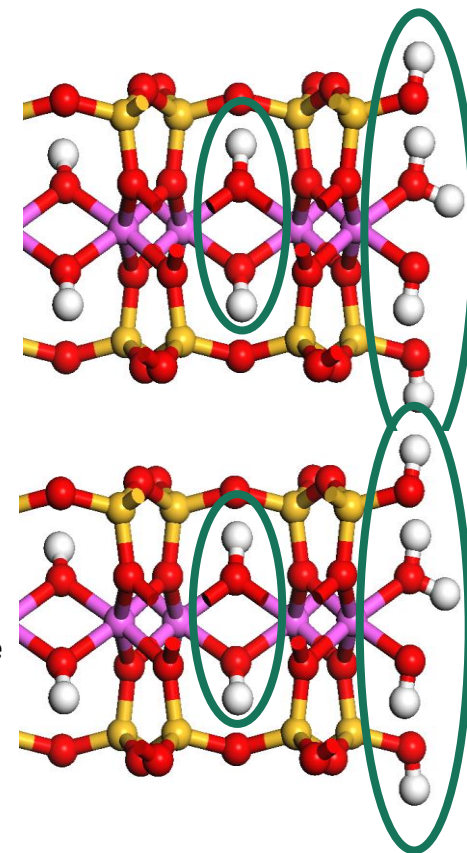
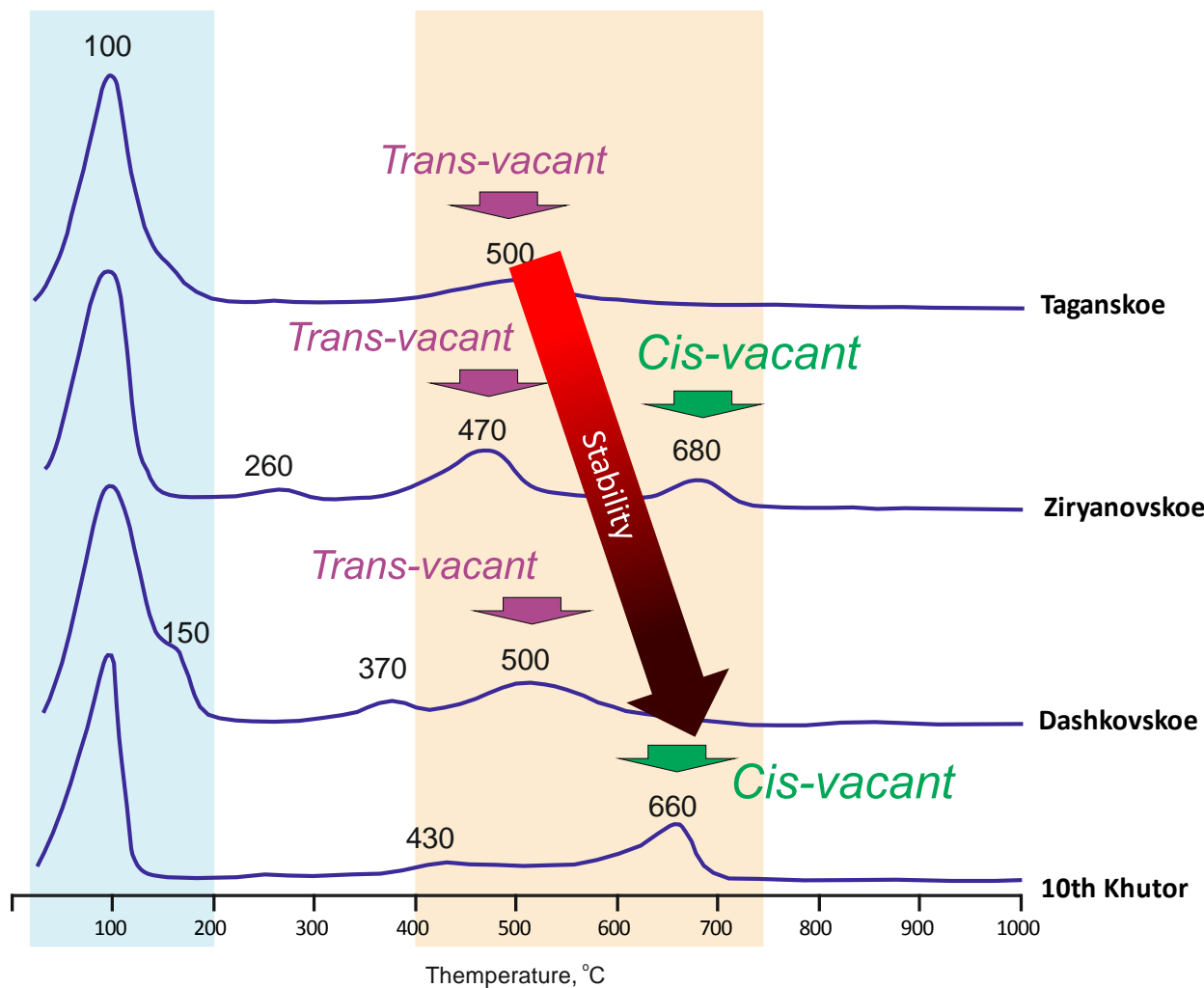
Стабильны в кислой среде

cis-вакантный



Дегидратация

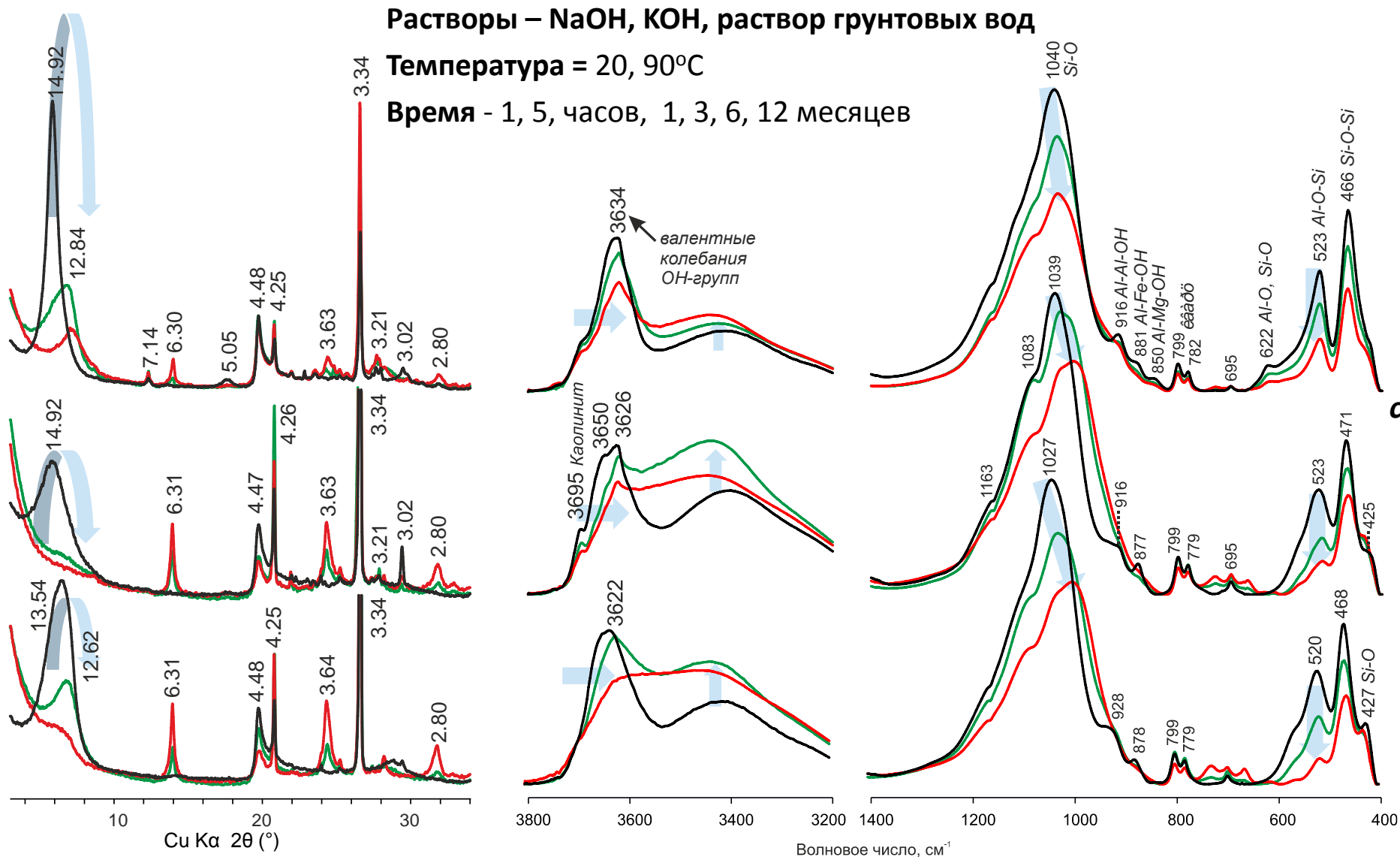
Дегидроксиляция



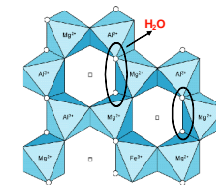
Экспериментальные исследования стабильности смектитов в щелочных условиях

Увеличение стабильности смектитов

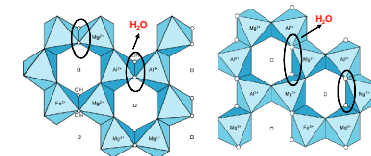
Таганский
Зырянский
10-й Хутор



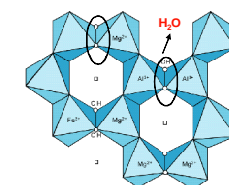
cis-вакантный



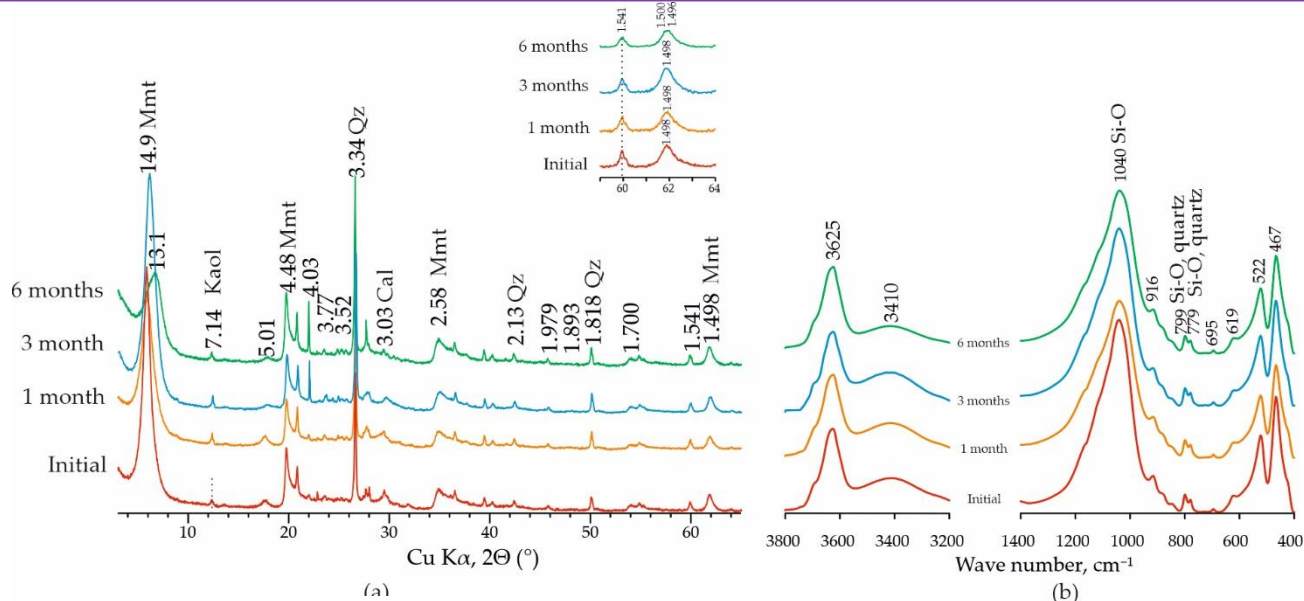
cis/trans-вакантный



trans-вакантный



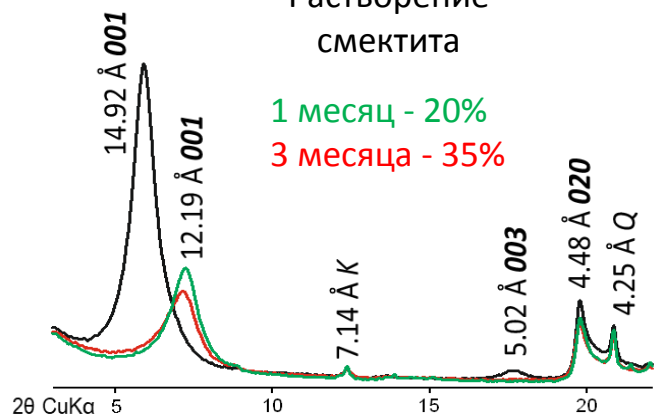
Лабораторные эксперименты для верификации термодинамического моделирования



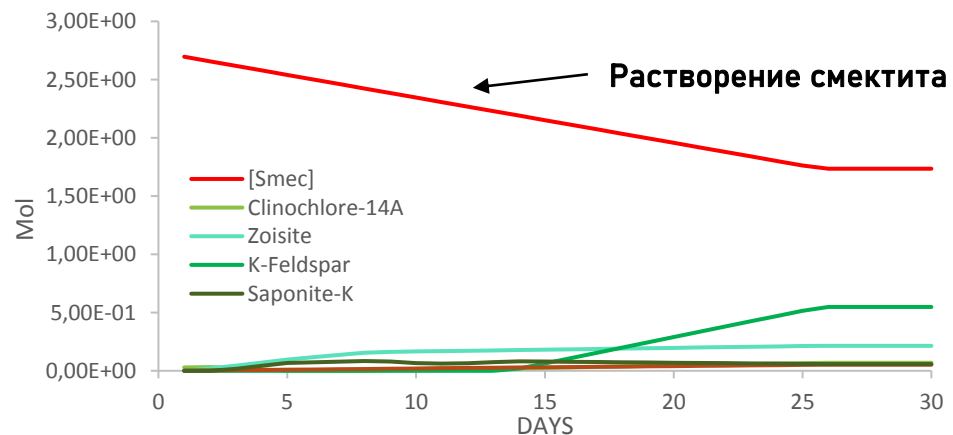
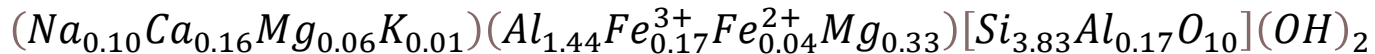
Воздействие продуктов выщелачивания бетона на структуру монтмориллонита

Термодинамическое моделирование для прогноза поведения инженерных барьеров на заданную временную перспективу

10-й Хутор

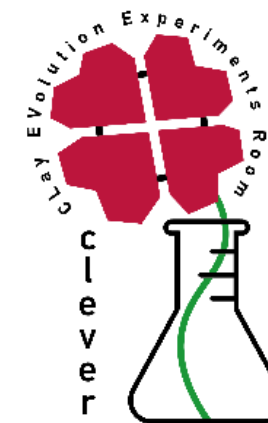


Воздействие щелочи на структуру монтмориллонита





Научно-исследовательский центр по разработке и оценке долговременной безопасности инженерных барьеров при изоляции РАО (НИЦ «Инженерные барьеры»)



Лаборатория
экспериментального
изучения эволюции
глинистых
материалов

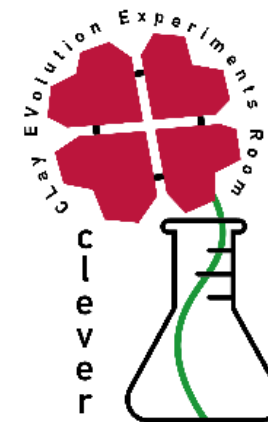
2022, декабрь



Научно-исследовательский центр по разработке и оценке долговременной безопасности инженерных барьеров при изоляции РАО (НИЦ «Инженерные барьеры»)



2023, март



I –

Изучение критических свойств глинистых материалов:

- эксплуатационные свойства
- прочностные свойства
- гидроизоляционные
- сорбционные/миграционные по отношению к радионуклидам

II - Изучение эволюции материалов в модельных условиях ПЗРО

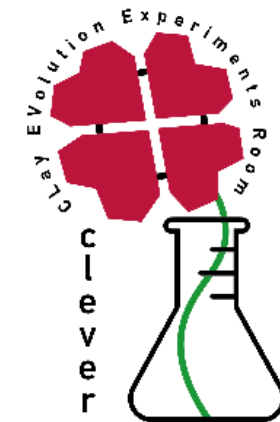
- модельные эксперименты по преобразованию отдельных компонентов ИББ
- модельные эксперименты в условиях воздействий микробных сообществ
- граничные преобразования в модельных условиях

III –

Подготовка экспериментов в ПИЛ

- средне-масштабные эксперименты
- макетные испытания
- подготовка полномасштабных экспериментов

Лаборатория экспериментального изучения эволюции глинистых материалов





Работы выполнены при поддержке:

- Темы государственного задания*
- Фонда фундаментальных исследований (РФФИ) –№ 18-29-12115-мк*
- Российского научного фонда (РНФ) - № 16-17-10270 и №22-17-00252*
- Компании Бентонит*

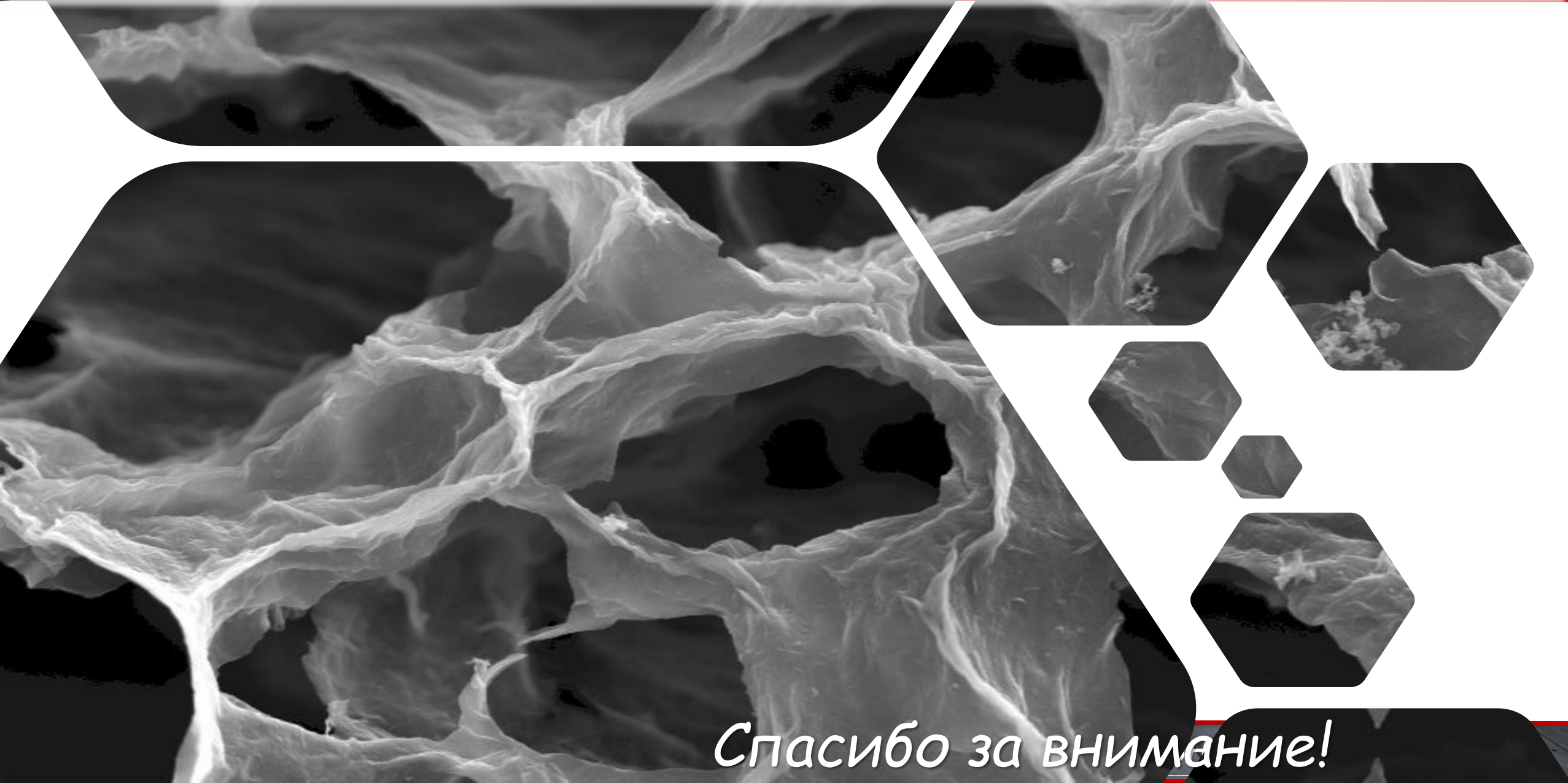
Особая признательность за помощь в проведении исследований:

О.В. Закусиной, к.г.-м.н. П.Е. Белоусову, Т.В. Королевой, А.А. Нестеренко, Б.В. Покидько, Якушеву А.И. (ИГЕМ РАН), к.г.-м.н. Чернову М.С., Гараниной С.А. (МГУ им. М.В. Ломоносова), моим коллегам по Группе и внештатным сотрудникам и т.д.

Особая признательность за вдохновение на развитие тематики исследований:

Акад. Н.С. Бортникову, член-корр. С.В. Юдинцеву, С.С. Уткину, И.И. Линге, Е.А. Тюпиной, В.А. Соколову, В.А. Дрицу, Б.А. Сахарову, Т.А. Соколовой, Б.Г. Ванштейну, И.А. Андреевой, P. Komadel, G. Chrysikos, V. Gionis и др.

Глинистые минералы – одни из самых удивительных объектов для исследования: различия в их составе, структуре и свойствах делает их изучение сродни прочтыванию детективного романа



Спасибо за внимание!

Расчет кристаллохимических формул глинистых минералов

Sample	Characteristic according to Emmerich et al. (2009)	Interlayer			Tetrahedral			Octahedral			Layer charge		
		Na	Ca	Mg	Si	Al	Al	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mg	Tet.	Oct.	Total
Даш-Салахлинское	Low-Charged Ferrian Montmorillonite	0.28	0.02	-0.01	3.9	0.02	1.37	0.32 (16%)	0.01	0.29	-0.02 (6.6%)	-0.32 (95,4%)	-0.34 -
$\text{Ca}_{0,02}\text{Mg}_{0,01}\text{Na}_{0,28}[(\text{Al}_{1,37}\text{Fe}^{\text{III}}_{0,32}\text{Fe}^{\text{II}}_{0,01}\text{Mg}_{0,29})(\text{Si}_{3,98}\text{Al}_{0,02})\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$													
10й Хутор	Low-Charged Montmorillonite	0.23	0.02	0.03	3.90	0.10	1.56	0.19	0.02 (9%)	0.25	-0.10 (29.2%)	-0.23 (70.8%)	-0.33
$\text{Ca}_{0,02}\text{Mg}_{0,03}\text{Na}_{0,23}[(\text{Al}_{1,56}\text{Fe}^{\text{III}}_{0,19}\text{Fe}^{\text{II}}_{0,02}\text{Mg}_{0,25})(\text{Si}_{3,90}\text{Al}_{0,1})\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$													
Таганское	Low-Charge Beidellitic Montmorillonite Low-Charged Al-Fe-Montmorillonite	0.30	0.01	0.01	3.92	0.08	1.41	0.29 (15%)	-	0.30	-0.08 (20%)	-0.29 (80%)	-0.37
$\text{Ca}_{0,01}\text{Mg}_{0,01}\text{Na}_{0,3}[(\text{Al}_{1,41}\text{Fe}^{\text{III}}_{0,29}\text{Mg}_{0,30})(\text{Si}_{3,92}\text{Al}_{0,08})\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$													
Зырянское	High-charged Ferrian Montmorillonitic Beidellite	0.30	0.04	0.01	3.63	0.37	1.57	0.31 (16%)	0.01	0.14	-0.37 (88.5%)	-0.05 (11.5%)	-0.41
$\text{Ca}_{0,04}\text{Mg}_{0,01}\text{Na}_{0,30}[(\text{Al}_{1,57}\text{Fe}^{\text{III}}_{0,31}\text{Fe}^{\text{II}}_{0,01}\text{Mg}_{0,14})(\text{Si}_{3,63}\text{Al}_{0,37})\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$													

Бентониты на различных стадиях очистки

Бентониты на различных стадиях очистки

non-treated

no CaCO_3

no C_{org}

no Fe/Al/Mn oxides

Tributh (1991)



10th Hutor Dash-Salakhlinское Taganskoe Zyryanskoe



10th Hutor Dash-Salakhlinское Taganskoe Zyryanskoe