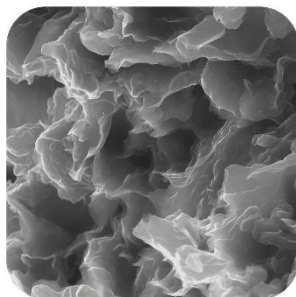




РОССИЙСКАЯ ГРУППА ПО ГЛИНАМ
И ГЛИНИСТЫМ МИНЕРАЛАМ
Russian Clay Group



ГЛИНЫ И ГЛИНИСТЫЕ МИНЕРАЛЫ - 2025

**VII Российское Совещание по глинам
и глинистым минералам**

ГЛИНЫ-2025

Материалы докладов
www.ruclay.com

УДК 54

ББК 26.3

Г54

Глины и глинистые минералы - 2025. VII Российское Совещание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2025». Томск, 8–12 сентября 2025 г. Материалы докладов. М.: ИГЕМ РАН, 2025. 194 с.

В сборнике представлены материалы VII Российского Совещания по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2025», НИ ТПУ, Томск.

Материалы VII Российского Совещания по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2025» представляют собой сборник тезисов пленарных и секционных докладов по разным направлениям изучения глин и глинистых материалов.

Материалы Совещания ориентированы на геологов, химиков, технологов, специализирующихся на изучении глин и глинистых минералов, студентов ВУЗов соответствующих специальностей и, в первую очередь, на специалистов, работающих в области изучения состава, строения и свойств глин, глинистых минералов и новых материалов, создаваемых на их основе, геологии, минералогии, нефтегазовой геологии, почвоведении, материаловедении, изучающих различные свойства грунтов, почв и горных пород, а также использующих глинистые материалы в качестве изолирующих барьеров безопасности при захоронении высокотоксичных отходов, в том числе радиоактивных.

Редакция и дизайн издания: М.А. Рудмин, А.Н. Николаева, Т.А. Королева, В.В. Крупская.

ISBN 978-5-88918-082-1

© Коллектив авторов, 2025

© НИ ТПУ, 2025

©Российская Группа по глинам и глинистым минералам, 2025

©ИГЕМ РАН, 2025

© РОСНЕФТЬ ТомскНИПИнефть, 2025

VII РОССИЙСКОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ГЛИНАМ И ГЛИНИСТЫМ МИНЕРАЛАМ – ГЛИНЫ-2025

Глины и глинистые минералы представляют собой одну из наиболее распространённых групп природных материалов, обладающих высокой информативностью при изучении геологических и техногенных процессов. Благодаря своим физико-химическим свойствам они служат ценными индикаторами в геологии, гидрогеологии и экологии, а также находят широкое практическое применение.

Материалы на основе глинистых минералов используются в самых разных сферах — от фармацевтики, медицины и косметологии до нефтегазовой промышленности, атомной энергетики и строительных технологий. Современные исследования в этой области продиктованы не только уникальными наноструктурными характеристиками этих минералов, но и потребностями экономики: развитием сырьевой базы, созданием новых эффективных сорбентов, совершенствованием технологий нефтепромысловых работ, а также расширением применения глин в смежных науках — геоэкологии, почвоведении, географии и других дисциплинах.

VII Российское Собрание «Глины-2025» посвящается изучению глин и глинистых минералов, их генезиса, кристаллохимии, физико-химических свойств и применения в различных отраслях индустрии. Цель – объединить исследователей и специалистов для обмена знаниями и методами, содействуя междисциплинарному сотрудничеству и развитию прикладных исследований. Задача конференции – создание платформы для обмена опытом и формирования новых научных коллективов, объединяющих ведущих специалистов, молодых учёных и представителей промышленности в области глин и глинистых минералов. В связи с активным развитием применения глинистых материалов в качестве компонентов инженерных барьеров безопасности при утилизации радиоактивных отходов в рамках работы Собрания выделена отдельная научная секция.

ПРОГРАММА СОВЕЩАНИЯ:

Программа Совещания состоит из пленарных, устных и стендовых секционных докладов по следующим направлениям:

Секция С1. Кристаллохимия и структурные особенности глинистых минералов и слоистых материалов

- вопросы строения глинистых минералов, а также современные методические подходы к их диагностике.

Секция С2. Геология, минералогия, геохимия и генезис глин.

- выявление генезиса пород, фациальный анализ, новые находки глинистых минералов в различных геологических условиях, особенности образования и преобразования, синтез и модификация структуры для применения в различных отраслях промышленности.

Секция С3. Свойства глин и слоистых материалов, их применение в промышленности.

- формирование свойств глинистых материалов, влияние структуры отдельных минералов на свойства, использование специфических свойств различных групп глинистых минералов в различных отраслях промышленности и народном хозяйстве, экологические аспекты использования глинистых минералов или знаний о них и т.д.

Секция С4. Экологическое использование глинистых минералов и слоистых материалов, в т.ч. при захоронении токсичных отходов.

- рассмотрение процессов, которые происходят при взаимодействии глинистых минералов и высокотоксичных отходов, в том числе радиоактивных отходов, вопросы сорбции и десорбции техногенных компонентов, анализ изолирующих свойств глин и глинистых материалов.

Секция С5. Компьютерное моделирование и искусственный интеллект в науке о глинистых минералах и слоистых материалах.

- рассматриваются возможности компьютерного моделирования, методов машинного обучения и искусственного интеллекта для решения фундаментальных и прикладных задач: от прогнозирования структуры и свойств минералов до интерпретации больших массивов геологических, геохимических и минералогических данных.

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Российская Группа по глинам и глинистым минералам (Russian Clay Group, <http://www.ruclay.com>)

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ, <https://tpu.ru>)

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН, www.igem.ru)

АО «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа» (ТомскНИПИнефть, <https://www.rosneft.ru>)



ФИНАНСОВАЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА

ООО «Компания Бентонит», <http://www.bentonit.ru>

ООО «Производственно-внедренческое предприятие СНК» <http://www.pvp-snk.ru>

ООО «Инскан», <https://inscan.ru>

ООО «Техноинфо», <https://technoinfo.ru>



Контакты для связи: Виктория Валерьевна Крупская, krupskaya@ruclay.com, +7-499-230-82-96; Максим Андреевич Рудмин, rudminma@tpu.ru, +7-913-858-19-22.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатели организационного комитета:

Сухих Л.Г., д.ф.-м.н., НИ ТПУ, Томск

Боев А.С., к.х.н., НИ ТПУ, Томск

Состав организационного комитета

Даси Э.Ш.С., НИ ТПУ, Томск

Лукьянова Е.А., НИ ТПУ, Томск

Максимов П.Н., НИ ТПУ, Томск

Максимова Н.А., НИ ТПУ, Томск

Молукпаева Д., НИ ТПУ, Томск

Николаева А.Н., к.г.-м.н., НИ ТПУ, Томск

Пасечник Е.Ю., к.г.-м.н., НИ ТПУ, Томск

Хитрин И.С., НИ ТПУ, Томск

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель программного комитета:

Крупская В.В., к.г.-м.н., ИГЕМ РАН, Москва

Рудмин М.А., к.г.-м.н., НИ ТПУ, Томск

Состав программного комитета

Белоусов П.Е., к.г.-м.н., ИГЕМ РАН, Москва

Блохин П.А., к.т.н., ИБРАЭ РАН, Москва

Вознесенский Е.А., д.г.-м.н., профессор, ИГЭ РАН, Москва

Гусева Н.В., д.г.-м.н., НИ ТПУ, Томск

Зайцева Т.С., к.г.-м.н., ИГТД РАН, Санкт-Петербург

Морозов И.А., ИГЕМ РАН, Москва

Новикова Л.Н., к.х.н., ВГУ, Воронеж

Паникоровский Т.Л., к.г.-м.н., НИ ТПУ, Томск

Рубан А.С., к.г.-м.н., НИ ТПУ, Томск

Сахаров Б.А., к.г.-м.н., ГИН РАН, Москва

Тарарушкин Е.В., к.ф.-м.н., НИУ ВШЭ, Москва

Тимофеева М.Н., ИК СО РАН, д.х.н., Новосибирск

Толпешта И.И., д.б.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Тюпина Е.А., к.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва

Уткин С.С., д.ф.-м.н., ИБРАЭ РАН, Москва

Чернов М.С., к.г.-м.н., МГУ им. М.В. Ломоносова

Шалдыбин М.В., д.г.-м.н., ТомскНИПИнефть, Томск

Якич Т.Ю., к.г.-м.н., НИ ТПУ, Томск

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады.....	12
<i>Новые данные о строении и стехиометрии представителей полисоматической серии палыгорскита-сепиолита.....</i>	<i>13</i>
С.М. Аксенов	
<i>Технобиогеомы объектов накопленного экологического вреда космодрома Байконур..</i>	<i>16</i>
И.Н. Семенков, С.А. Леднев, Т.В. Королева	
<i>Влияние фактора ландшафта на эффективность ремедиации техногенно-загрязненных почв с помощью вермикулит-лизардитового материала бедных руд ..</i>	<i>19</i>
М.В. Слуковская, Ю.А. Дворников, Т.К. Иванова, К.В. Иващенко, И.П. Кременецкая, А.Г. Петрова, А.С. Сошина, А.А. Чапоргина	
СЕКЦИЯ С1: Кристаллохимия и структурные особенности глинистых минералов и слоистых материалов	22
<i>К вопросу раздельного определения аморфной и кристаллической форм кремнезема в горных породах.....</i>	<i>23</i>
П.Е. Белоусов, Б.В. Покидько, А.А. Журавлев, Т.А. Королева, В.В. Крупская	
<i>Диагностика структурно-минералогических особенностей глинистого сырья Урало-Сибирского региона</i>	<i>26</i>
Т.В. Вакалова, В.И. Верецагин	
<i>Прикладная топоминералогия глин в россыпях алмазов при поисках их коренных источников на примере палеокарстов Накынского кимберлитового поля.....</i>	<i>29</i>
И.И. Никулин	
<i>Титаносиликатные слюды: миграция ионов, ионный обмен и DFT-моделирование и геометрический анализ</i>	<i>32</i>
Т.Л. Паниковровский, Г.О. Калашиникова, Н.А. Кабанова, С.В. Кривовичев	
<i>Сорбционные и каталитические свойства семикатионного слоистого двойного гидроксида состава MgNiCo/AlFeYGD</i>	<i>35</i>
Е.С. Селиверстов, Е.В. Храмов, О.Е. Лебедева	
<i>Гидротермальный синтез Ge-содержащего аналога парагонита.....</i>	<i>37</i>
Т.В. Сеткова, Л.А. Горелова, Т.М. Бубликова, О.С. Верецагин, Е.С. Захарченко, А.В. Спивак	
<i>О некоторых особенностях внутрикристаллического набухания монтмориллонита</i>	<i>39</i>
Р.М. Усманов, М.Г. Храмченков	
СЕКЦИЯ С2: Геология, минералогия, геохимия и генезис глин.....	42
<i>Минерально-сырьевая база промышленно важных месторождений глинистого сырья России.....</i>	<i>43</i>
П.Е. Белоусов	

Геохимические особенности верхнепалеозойских глинистых сланцев Новосибирской области	46
Л.Г. Вакуленко, О.Д. Николенко, Н.И. Яндола	
Минералогия почв степных блюд Северного Прикаспия	49
Е.Б. Варламов, Н.А. Чурилин, Р.Э. Мусаэлян, А.В. Колесников, А.В. Чурилина	
Глауконит месторождения Докан (Ирак): структурно-химические характеристики и условия формирования	52
Э. Даси, И. С. Хитрин, М.А.Рудмин	
Использование данных по стабильным изотопам бора ($\delta^{11}\text{B}$) для оценки взаимодействия в системе подземная вода-глины на примере юго-восточного Забайкалья.....	55
В.В. Дребот, С.В. Борзенко, О. Шукаар-Сташ, Р. Стотлер	
Состав глинистой фракции кремнисто-глинистых пород баженовского горизонта (Западная Сибирь).....	58
С.С. Дягилев, М.В. Шалдыбин	
Особенности аутигенного хлорита песчаников нижнемеловой ачимовской толщи северных районов Западной Сибири	61
Е.А. Жуковская	
Влияние условий синтеза на формирование минералов группы каолинита	64
Т.А. Королева, Б.В. Покидько, И.А. Морозов, А.А. Нестеренко, В.В. Крупская	
Особенности кристаллического строения и процессов образования гидротермального каолинита рудопоявления Утёсное (Приморский край)	66
Д.М. Коршунов, Г.Н. Овсянников	
Характеристика гидротермальных глин Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка)	69
О.В. Кравченко, С.Н. Рычагов, А.В. Сергеева	
«Контейнеры и свидетели»: глинистые минералы как индикаторы условий сегрегации ЭПГ в измененных ультрабазитах массива Дюкали (Хабаровский Край)72	
Б.Б. Левочкий, Т.Ю. Якич	
Структурно-минералогические особенности нижнехвалынских «шоколадных глин» Нижнего Поволжья.....	76
Р.Э. Мусаэлян, Б.А. Сахаров, Е.В. Щепетова	
Глинистые породы венд-кембрийских отложений северо-восточной части Балтийской моноклинали.....	79
В.Н. Подковыров, О.С. Верецагин	
Иллит в соленосной кунгурской толще нижней перми как индикатор стадии литогенеза.....	82
О.Б. Пономарев, И.И. Никулин	

Диагенетические трансформации глинистых минералов в условиях просачивания метан-содержащих флюидов на примере донных осадков моря Лаптевых	85
А.С. Рубан, М.А. Рудмин, Е.С. Деева	
Типизация почв по гидротермальному градиенту в долине реки Гейзерной (Кроноцкий заповедник)	88
И.Н. Семенов, В.В. Крупская, М.П. Лебедева, М.С. Чернов, О.В. Закусина, Г.В. Клинк, А.В. Завадская	
Формирование состава поглощенного катионного комплекса смектита Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка, Россия)	91
А.В. Сергеева, С.Н. Рычагов, О.В. Кравченко, Е.В. Карташева, А.А. Кузьмина, М.А. Назарова, А.Г. Вахромеев	
Дифференциальная диагностика высокодисперсных слоистых силикатов в позднечетвертичных донных отложениях ледниковых озер Восточного Саяна	94
П.А. Солотчин, Э.П. Солотчина, Е.В. Безрукова, А.А. Щетников, А.Н. Жданова	
Глинистые образования гидротермального генезиса и особенности структурных контактов в них	97
М.С.Чернов, В.Н. Соколов, В.В. Крупская, А.Б. Ермолинский, О.В. Разгулина	
Состав глинистой фракции песчаных пород нефтегазоносных пластов юры и мела в отношении химического состава вмещающих ее пород (Западная Сибирь)	100
М.В. Шалдыбин	
СЕКЦИЯ С3: Свойства глин и слоистых материалов, их применение в промышленности	103
Получение геополимерных материалов на основе природных глинистых минералов	104
А.А. Алексеев, Ю.А. Аликина, О.Ю. Голубева	
Физико-химические принципы выбора глинистого сырья в технологии керамических пропантов	107
В.И. Вережагин, Т.В. Ваколова	
Пробоподготовка песчаных горных пород. 2. Экстракция образцов	110
Е.С. Деева, М.В. Шалдыбин, А.В. Канаки, А.Е. Алексеева, И.В. Эфтор	
Влияние добавок огнеупорной глины на свойства композиционного состава	113
П.В. Дякин, Ю.Е. Пивинский	
Пробоподготовка песчаных горных пород. 1. Размол образцов	116
А.В. Канаки, Е.С. Деева, М.В. Шалдыбин, А.Е. Алексеева	
Исследование галопелитовых прослоев продуктивной толщи Верхнекамского месторождения	119
А.М. Лебедева, А.И. Рысин, Н.А. Румянцева	
Природные наноконтейнеры на основе галлузита для создания микроудобрений ..	121
П.Н. Максимов, Н.А. Максимова, П.А. Косцова, С.С. Повилайнен	

Исследование влияния структуры каолинов на их технологические свойства	124
А.А. Нестеренко, И.А. Павлова, Т.А. Королева, В.В. Крупская	
Влияние степени упорядоченности структуры каолинитов на литейные свойства каолиновых шликеров.....	127
И. А. Павлова, Д.И. Ащеулов, З.А. Жуйкова, Е.П. Фарафонтובה	
Зависимость прочности при одноосном сжатии компактированных бентонитовых глин от времени выдержки	129
М.О. Роцин, В.П. Шашкин, В.Б. Комаров, С.В. Закусин	
Комплексные минеральные нанокмползнты на основе глауконита Кирдинского месторождения (Mg, S, N): опыт создания и характеристика	131
И.С. Хитрин, М.А. Рудмин	
СЕКЦИЯ С4: Экологическое использование глинистых минералов и слоистых материалов, в том числе при захоронении токсичных отходов.....	135
Сравнение сорбции радионуклидов ^{90}Sr и ^{90}Y глинистыми минералами из карбонатных растворов.....	136
Д.В. Грязнова, Г.О. Калашикова, О.И. Сийдра, В.Н. Яковенчук, Я.А. Пахомовский, О.Ф. Гойчук, И.Р. Елизарова, Д.В. Трунов, М.Ю. Глазунова, И.В. Смирнов	
Исследование свойств синтетических аналогов минералов линтисита и натисита для области мембранных технологий: разделение смесей азеотропного состава и газов	138
Г.О. Калашикова, А.Ю. Пулялина, Д.В. Грязнова, Я.А. Пахомовский, М.Ю. Глазунова, В.Н. Яковенчук	
Закономерности изменения свойств бентонитовых глин материалов инженерных барьеров безопасности в условиях ПЗГРО	140
Ф.С. Карпенко	
Исследование диффузии иодид-анионов через образцы компактированного бентонита, модифицированного металлическим серебром	143
П.П. Козлов, Е.А. Тюпина, А.В. Прядко	
Эффективность работы магнитных композитных сорбентов цеолит/ $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при извлечении ионов никеля из водных растворов	147
А.В. Котова, Л.А. Новикова, Е.В. Томина	
Обоснование выбора бентонита в качестве компонента инженерных барьеров безопасности в российской концепции глубинного геологического захоронения РАО	151
В.В. Крупская, С.В. Закусин, Т.А. Королева, О.В. Закузина, И.А. Морозов	
Исследование сорбции кобальта полиминеральной глиной месторождения «Городное»	153
Д.А. Кузьмук, Н.А. Маковская	

<i>Изменение строения и свойств глинистых материалов при нагреве до 80 °С.....</i>	<i>156</i>
<i>А.Д. Кутхуджина, А.Б. Ермолинский, М.С. Чернов</i>	
<i>Сорбция цезия и стронция на бентонитовых глинах различных месторождений..</i>	<i>158</i>
<i>И.Р. Меньшикова-Тонян, А.С. Семенова, В.С. Свительман, В.В. Крупская, А.Ю. Романчук, С.Н. Калмыков</i>	
<i>Взаимодействие глинистых материалов инженерных барьеров безопасности с металлами</i>	<i>161</i>
<i>И.А. Морозов, В.В. Крупская, С.В. Закусин, П.П. Козлов</i>	
<i>Применение природных глинистых материалов для обеспечения безопасного захоронения графитовых радиоактивных отходов.....</i>	<i>164</i>
<i>А.О. Павлюк, Е.В. Беспала, С.Г. Котляревский, Р.И. Кан, Е.П. Зеленецкая, С.С. Мешиков, Л.А. Глушко</i>	
<i>Микропористые и нанотрубчатые глинистые минералы (глауконит и галлуазит) как носители нутриентов в управляемых и полифункциональных удобрениях</i>	<i>166</i>
<i>М.А. Рудмин, Е.В. Тарарушкин, И.С. Хитрин, Э. Даси</i>	
<i>Органоглины как адсорбенты для органических поллютантов</i>	<i>169</i>
<i>И.В. Хайданов, Л.В. Переломов, Т.С. Дудникова, М.М. Герцен</i>	
<i>СЕКЦИЯ С5: Компьютерное моделирование и искусственный интеллект в науке о глинистых минералах и слоистых материалах</i>	<i>172</i>
<i>Молекулярно-динамическое исследование взаимодействия глины и кварца в водном растворе</i>	<i>173</i>
<i>А.А. Глушаков, Е.В. Тарарушкин, Г.С. Смирнов</i>	
<i>Экспериментальные и теоретические исследования координации урана на смектитовых глинах.....</i>	<i>175</i>
<i>А.Д. Крот, Е.В. Тарарушкин, А.Л. Тригуб, И.Э. Власова, С.Н. Калмыков</i>	
<i>Компьютерное атомистическое моделирование цементных АГт фаз.....</i>	<i>177</i>
<i>Е.В. Тарарушкин, А.А. Глушаков, Г.С. Смирнов</i>	
<i>Члены организационного комитета</i>	<i>179</i>
<i>Члены программного комитета</i>	<i>180</i>
<i>Список зарегистрированных участников</i>	<i>181</i>

Материалы
VII Российского Совещания по глинам и глинистым
минералам – ГЛИНЫ-2025

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Новые данные о строении и стехиометрии представителей полисоматической серии палыгорскита-сепиолита

С.М. Аксенов¹

Соединения, содержащие *TOT*-модули, обладают широким разнообразием кристаллических структур (Аксенов и др. 2023). Среди них особо выделяется полисоматическая серия палыгорскита-сепиолита (или семейство палысепиолов) (Ferraris, Gula, 2005; Suárez, García-Romero, 2013), для которой известно большое число различных структурных представителей. Основу их кристаллических структур составляют тетраэдрические слои с топологией 6_3 , аналогичные таковым в структурах родственных филлосиликатов. За счет различной ориентации пироксеновых цепочек, образующих данные тетраэдрические слои, формируются все представители полисоматической серии, которая объединяет в себе структуры типа палыгорскита, сепиолита и калиферсита. Соседние тетраэдрические слои объединяются с помощью лент из реберносвязанных *Мф*-октаэдров, которые представляют собой вырезки из октаэдрического бруситового слоя, формируя гетерополиэдрический каркас с системой широких каналов, идущих параллельно *TOT*-модулям. При этом ширина каналов непосредственно зависит от ширины *TOT*-модулей. Данные структурные особенности определяют разнообразие физических и химических свойств представителей полисоматической серии палыгорскита-сепиолита (Galan, 1996).

Согласно схеме объединения одномерно протяженных *TOT*-модулей, предложенной Т. Золтаи (Zoltai, 1981), кристаллические структуры известных представителей можно записать в следующем идеализированном виде:

- $R-0-R-3/4$ – для палыгорскита;
- $R-0-R-0-R-3/4$ – для сепиолита;
- $R-0-R-3/4-R-0-R-0-R-3/4$ – для калиферсита.

По аналогии с гетерофиллосиликатами для представителей полисоматической серии палыгорскита-сепиолита можно вывести так называемую «функцию генерации структур» (Hawthorne, 2012), которая будет описывать стехиометрию всех известных представителей, а также потенциально возможных структур и гибридных аналогов (Аксенов и др. 2023). Поскольку соседние одномерно протяженные *TOT*-модули объединяются только через кислороды тетраэдров, то октаэдрические цепочки или широкие октаэдрические ленты будут характеризоваться наличием внешних несвязных вершин.

¹ФИЦ Кольский научный центр РАН, Анапты, aks.crys@gmail.com

С учетом этого, объединение TOT-модулей с формированием тетраэдрического слоя приводит к формированию структур, которые можно описать следующей общей формулой:

$$S_n = X_i \{ M_{(3n-3)} \Psi_{2(n-1)} (\tilde{M}_{(2-k)} \emptyset_{2(2-k)}) (Si_{2n} O_{5n})_2 \}$$

$$S_n = X_i \{ M_{(3n-3)} \Psi_{2(n-1)} (\tilde{M}_{(2-k)} \emptyset_{2(2-k)}) (Si_{2n} O_{5n})_2 \}, \quad (1)$$

где M – октаэдрические позиции октаэдрической O -ленты, а Ψ – анионные лиганды; $\tilde{M}\tilde{M}$ – «внешние» октаэдры O -ленты, а $\emptyset\emptyset$ – «висячие» анионные лиганды, координирующие «внешние» октаэдры; X_i – дополнительные катионы, анионы, анионные группировки и молекулы воды, которые располагаются в крупных каналах. Значение коэффициента k контролирует количество «внешних» $\tilde{M}\tilde{M}$ – октаэдров O -ленты (рис. 1).

В случае, если кристаллическая структура содержит несколько типов TOT-модулей (как, например, в структуре калиферситы), тогда $n=a+b$, а формула (1) приобретает вид:

$$S_{a+b} = X_i \{ M_{(3a-3)} \Psi_{2(a-1)} (\tilde{M}_{(2-k)} \emptyset_{2(2-k)}) (Si_{2n} O_{5n})_2 \} \times$$

$$\{ M_{(3b-3)} \Psi_{2(b-1)} (\tilde{M}_{(2-l)} \emptyset_{2(2-l)}) (Si_{2n} O_{5n})_2 \}$$

$$S_{a+b} = X_i \{ M_{(3a-3)} \Psi_{2(a-1)} (\tilde{M}_{(2-k)} \emptyset_{2(2-k)}) (Si_{2n} O_{5n})_2 \} \times$$

$$\{ M_{(3b-3)} \Psi_{2(b-1)} (\tilde{M}_{(2-l)} \emptyset_{2(2-l)}) (Si_{2n} O_{5n})_2 \} \quad (2)$$

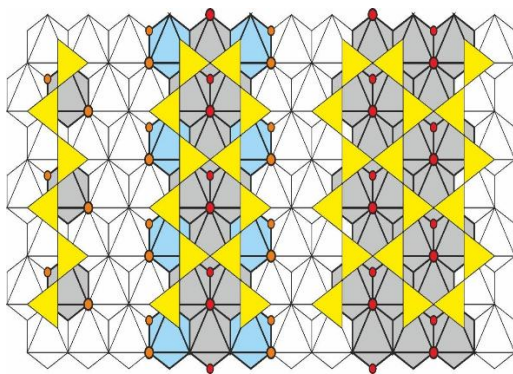
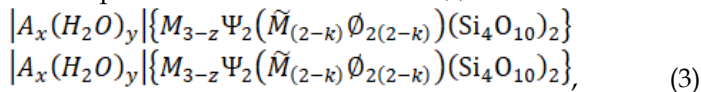


Рис. 1 Различные TOT-модули в кристаллических структурах представителей полисоматической серии палыгорскита-сепиолита

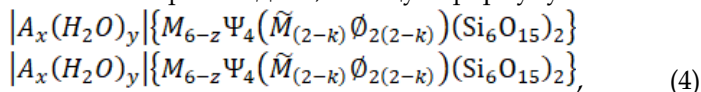
Наиболее представительной среди полисоматической серии палыгорскита-сепиолита является группа соединений со структурным типом палыгорскита ($n=2$), которая объединяет минералы палыгорскит, йофортьерит, туперссуатсиаит, виндхукит, раит и недавно открытый в фонолитой дайке Винд Маунтин (Нью-Мехико, США) виндмаунтинит с идеализированной формулой $\{Fe_3+2Mg_2(Si_4O_{10})_2(OH)_2(H_2O)_4\} \cdot 4H_2O$.

Используя (1), общую формулу минералов со структурным типом палльгорскита можно записать в виде:



где $0 < z < 1$.

Группа соединений со структурным типом сепиолита ($n=3$) менее представительная и объединяет минералы сепиолит, ферросепиолит, лохлинит и фалкондоит, а общую формулу можно записать в виде:



где $0 < z < 2$.

Единственный известный на данный момент представитель полисоматической серии палльгорскита-сепиолита с гибридной структурой – минерал калиферсит, в котором TOT-модули с $n = 2$ объединяются с модулями с $n = 3$.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-77-10065-П, а также темы Госзадания FMEZ-2024-0015.

Aksenov S.M., Charkin D.O., Banaru A.M. et al. Modularity, polytypism, topology, and complexity of crystal structures of inorganic compounds (Review). J. Struct. Chem. 2023. 64(10), 1797–2028.

Ferraris G., Gula A. Polysomatic aspects of microporous minerals - heterophyllosilicates, palysepiolites and rhodochite-related structures. Rev. Mineral. Geochem. 2005. 57(1), 69–104.

Galan E. Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays. Clay Minerals. 1996. 31(4), 443–453.

Hawthorne F.C. Bond topology and structure-generating functions: graph-theoretic prediction of chemical composition and structure in polysomatic T–O–T (biopyribole) and H–O–H structures. Mineral. Mag. 2012. 76(5), 1053–1080.

Suárez M., García-Romero E. Sepiolite–palygorskite: A continuous polysomatic series. Clays, Clay Minerals. 2013. 61(5), 461–472.

Zoltai T. Amphibole asbestos mineralogy. Rev. Mineral. Geochemistry. 1981. 9A, 237–278.

Технобиогеома объектов накопленного экологического вреда космодрома Байконур

И.Н. Семенков¹, С.А. Леднев¹, Т.В. Королева¹

Одна из экологических проблем, унаследованных Россией от СССР, связана с ракетно-космической деятельностью на космодроме Байконур – первом и крупнейшем в мире. После распада СССР Байконур и объекты его наземной инфраструктуры оказались на территории суверенной Республики Казахстан, и возникли вопросы межгосударственных земельных и правовых отношений. Договор аренды комплекса «Байконур» 1994 г. определяет, что арендатор (Российская Федерация) обязуется «использовать и содержать арендуемые объекты с учетом требований экологической безопасности, правил природопользования, охраны окружающей среды, проводить мероприятия по очистке районов падения от отделяющихся частей ракет-носителей». По завершении аренды Байконура все объекты космодрома и его наземной инфраструктуры будут обследованы казахстанскими природоохранными органами для определения ущерба, нанесенного окружающей среде, и суммы компенсации от данной деятельности.

Первые открытые публикации о негативном воздействии космической деятельности на окружающую среду и здоровье населения Казахстана появились в начале 1990-х годов. В 1999 г. ситуация обострилась после двух аварий ракет-носителей «Протон», топливо которых – высокотоксичный, канцерогенный несимметричный диметилгидразин (НДМГ, гептил). К настоящему моменту с Байконура запущено более 1,5 тыс. ракет космического назначения, в результате чего в районах падения Центрального и Северного Казахстана сформировалось более 5 тыс. мест штатного падения первых ступеней.

Первая ступень ракеты-носителя «Протон» тяжелого класса приземляется моноблоком. На этом участке в зависимости от сезона года формируются разные по площади и интенсивности проявления зоны механических (среднее 55–1740 м², частота появления 6–76% в зависимости от интенсивности проявления, 33 места падения, обследованных в 2014–2024 гг.) и пирогенных (21 тыс. м², 36%) нарушений почвенного и растительного покровов, проливаются компоненты ракетного топлива – гептил и азотный тетраоксид.

Первая ступень ракеты-носителя «Союз» среднего класса разделяется на 4 блока, образуя соответствующее число мест падения (в редких случаях один из блоков разделяется на несколько более мелких части, разлетающихся на существенное расстояние). На этих местах падения также формируются механические (12 – 315 м², 13–75% в зависимости от интенсивности проявления,

¹МГУ, Москва, semenkov@geogr.msu.ru

190 обследованных в 2014–2024 гг. блоков) и пирогенные (24 тыс. м², 79%, n=209) нарушения. Помимо этого, проливается керосин (3,6 м², 47%, n=126) и перекись водорода (вспомогательное вещество; 20 м², 57%, n=152).

На пилотируемых кораблях «Союз» по настоящее время и ранее для защиты наиболее ценной космической нагрузки используют двигательные установки системы аварийного спасения (ДУ САС), штатное падение которых провоцирует образование воронок глубиной до нескольких метров и диаметром до десятка метров (28 м², 100%, n=30 за 2014–2024 гг.), а также погребение почв и растительности материалом, выбитым из воронки. Мощность данного слоя не превышает 15 см. Помимо этого, на местах падения ДУ САС часты возгорания растительности (2785 м², 63%, n=19).

При единичных аварийных ситуациях, сопровождавшихся серьезными экологическими последствиями (6 с 1999 г.), наблюдается аналогичный набор воздействий, но, как правило, на большей территории и большей интенсивности (Koroleva et al., 2021).

Фрагменты первой ступени в течение недели после пуска вывозят для утилизации. Крупные места проливов гептила обрабатывают детоксикантом. Места обнаружения значимых количеств гептила повторно обследуют на следующий вегетативный сезон для контроля остаточных количеств токсичного топлива. При этом по результатам повторного опробования гептил ни разу не обнаружили, так как это вещество в аридных экосистемах Казахстана быстро разлагается на менее опасные дериваты или переходит в неподвижную форму (Королева и др. 2023). Образовавшиеся в результате падения частей ракет-носителей углубления не подвергают планированию для предотвращения дополнительного негативного вреда в результате воздействия техники.

Таким образом, по отдельности все места штатного и аварийного падения частей ракет-носителей являются объектами накопленного экологического вреда. Их совместно при определенной группировке можно рассматривать как технобиогеомы по М.А. Глазовской (1972) – ландшафтно-геохимические системы (группы ландшафтов) со сходным уровнем устойчивости и характером ответных реакций на определенные техногенные воздействия. Объединенные в хроноряды схожие по набору воздействий разновозрастные места падения позволяют оценивать скорость естественного самовосстановления экосистем после механического, пирогенного воздействия, поступления углеводородных топлив и азотсодержащих веществ.

В этом плане наиболее изучен пирогенный ряд, т.к. принципиально пожары, образующиеся на местах падения частей ракет-носителей, не отличаются от природных и антропогенных пожаров иного генезиса. Экосистемы Центрального Казахстана характеризуются пирогенной

циклическостью, особенно заметной в растительном покрове. Наиболее распространённые здесь полынные сообщества после пожаров сменяются однолетниковыми и дерновинно-злаковыми (выделяется 4 этапа, различающиеся по характеру субдоминантов и доминантов). В ходе пирогенной сукцессии полынный обычно восстанавливается за 10-20 лет. Восстановление некоторых его характеристик требует >40 лет. Регулярные возгорания растительности в результате пусков ракет ускоряют исторически сложившийся цикл оборота огня в 15-20 лет. Но небольшая (меньшая на порядки относительно крупных пожаров иного происхождения) площадь пирогенного воздействия от падения частей ракет-носителей в Центральном Казахстане благоприятно сказывается на сроке восстановления растительности до исходного состояния, существенно не влияя на растительный покров региона в целом.

В условиях аридных экосистем поступающие при штатных проливах объёмы гептила разрушаются в течение нескольких месяцев (Koroleva et al., 2018), а керосина – до нескольких лет (Senenkov et al., 2025). Открытым остаются вопросы длительности восстановления экосистем после оказанного механического воздействия и сохранения повышенных концентраций нитратов после проливов азотного тетраоксида, а также восстановления экосистем, испытавших комплексное воздействие (механическое, пирогенное и химическое).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 25-74-20011).

Глазовская М.А. Технобиогеомы – исходные физико-географические объекты ландшафтно-геохимического прогнозирования. Вестник МГУ. Сер. География. 1972. 6. 23-35.

Королева Т.В., Семенов И.Н., Леднев С.А., Солдатова О.С. Гептил и продукты его трансформации в почвах: источники поступления, диагностика, поведение, токсичность и ремедиация загрязненных территорий (обзор). Почвоведение. 2023. 2. 240-258.

Koroleva T.V., Krechetov P.P., Semenov I.N., Sharapova A.V., Lednev S.A., Karpachevskiy A.M., Kondratyev A.D., Kasimov N.S. The environmental impact of space transport. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2018. 58. 54-69.

Koroleva T.V., Krechetov P.P., Semenov I.N., Sharapova A.V., Lednev S.A., Karpachevskiy A.M., Kondratyev A.D., Kasimov N.S. The environmental impact of space transport. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2018. 58. 54-69.

Semenov I.N., Koroleva T.V., Lednev S.A. Soil pollution with jet-fuel by the Russian aerospace transportation. Science of the Total Environment. 2025. 972

Влияние фактора ландшафта на эффективность ремедиации техногенно-загрязненных почв с помощью вермикулит-лизардитового материала бедных руд

М.В. Слуковская^{1,2}, Ю.А. Дворников^{2,3}, Т.К. Иванова¹, К.В. Иващенко^{2,3}, И.П. Кременецкая¹, А.Г. Петрова¹, А.С. Сошина^{1,2}, А.А. Чапоргина¹

Проведены комплексные исследования возможности использования материалов из склада бедных вермикулит-лизардитовых руд, образовавшегося при разработке месторождения флогопита (Ковдор, Мурманская обл.) в качестве основы и компонентов технологий ускоренного создания растительного покрова на техногенно-загрязненных территориях, подвергшихся влиянию предприятия цветной металлургии.

Изучено влияние фактора ландшафта на химические, биохимические и физиологические параметры компонентов экосистем и техноземов, сформированных с использованием исходных вскрышных пород, содержащих слоистые силикаты (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения и внешний вид экспериментальных площадок

¹ФИЦ Кольский научный центр РАН, Анамуты, m.slukovskaya@ksc.ru

²Smart Urban Nature Lab, РУДН, Москва, Анамуты, ydvornikow@gmail.com

³ИФХуБПП РАН, Пушино, ivashchenko.kv@gmail.com

Выявлено, что биомасса растений на южном склоне автоморфного ландшафта и в полугидроморфном ландшафте была максимальной, этим же вариантам соответствовали и наиболее высокие значения почвенного дыхания, а также накопления меди растениями. Проведенные исследования

продemonстрировали устойчивость травянистых растений автономного ландшафта. При этом, состояние растений понижения и северной и южной экспозиции склона оценивается в слабой и средней степени угнетения, что может быть связано с высоким уровнем накопления ТМ (южная экспозиция) или пониженными температурами (северная экспозиция). Водный индекс у растений, несмотря на расположение в рельефе соответствует оптимальным значениям. Вероятно, более высокие содержания тяжелых металлов в почвах транзитного и трансаккумулятивного ландшафта подавляют фотосинтетическую активность и способствуют созданию стрессовых условий для травянистых растений.

Изучено депонирование органического вещества (ОВ) в минеральном материале, а также микробиологические параметры техноземов. По сравнению с контролем ОВ техноземов в основном состоит из более доступной для микробного разложения фракции и в меньшей степени закреплена минеральной матрицей. Кроме того, существенные различия в микробиоме были выявлены не только между контрольными почвами и почвенными конструкциями, но и для разных геоморфологических позиций. Значительно отличались микробиологические свойства образцов с участка гидроморфной позиции в рельефе от образцов с участков автоморфной позиции. Основные различия касались содержания органического вещества, микробной биомассы и ее активности.

Исследовано влияние топографического индекса влажности (TWI) на накопление тяжелых металлов техноземами, сформированными с использованием вермикулит-лизардитовых отходов добычи флогопита (Slukovskaya et al., 2025). Двухлетний полевой эксперимент по созданию щелочного сорбционного барьера из вермикулит-лизардитовых отходов горнодобывающей промышленности на загрязненной ТМ территории в условиях влажного климата Субарктики продемонстрировал пролонгированное действие минерального материала, содержащего слоистые силикаты, для рекультивации техногенно-нарушенной территории с автоморфными и гидроморфными почвами и широким диапазоном топографического индекса увлажненности. Содержание макроэлементов было стабильным после 2 лет полевого эксперимента и не подвержено влиянию TWI, тогда как ТМ накапливались в минеральном материале и TWI является основным фактором, определяющим значения накопления и подвижности ТМ в этом минеральном материале, а также скорость наступления фенологических фаз во 2-м и 3-м вегетационных сезонах.

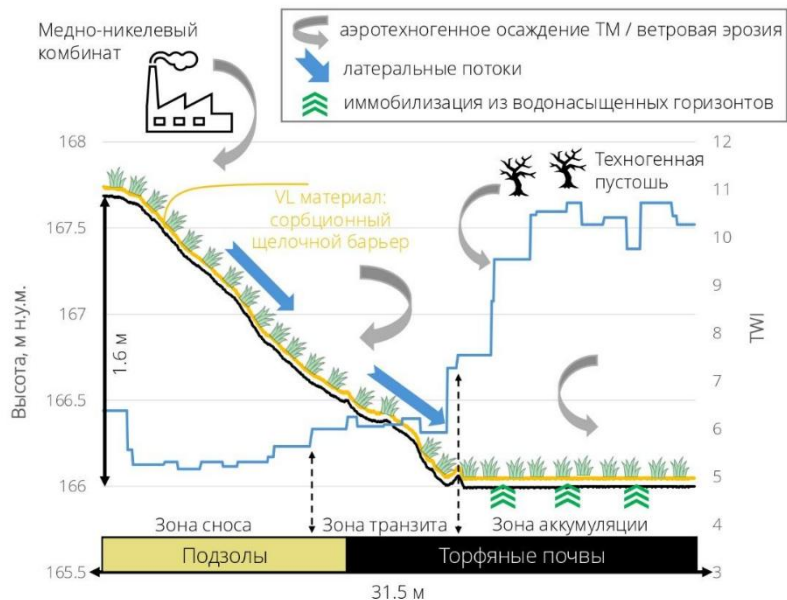


Рис. 2. Концептуальная схема функционирования щелочного сорбционного барьера из вермикулит-лизардитового материала на техногенной пустоши

Таким образом, полевые эксперименты по созданию щелочного сорбционного барьера из вермикулит-лизардитовых отходов добычи флогопита на загрязненной ТМ территории в условиях влажного климата Субарктики продемонстрировали пролонгированное действие минерального материала, содержащего слоистые силикаты, для рекультивации техногенно-нарушенных почв в автоморфных, полугидроморфных и гидроморфных ландшафтах и широким диапазоном топографического индекса влажности. Данные исследования важны для разработки экономически эффективной технологии озеленения территорий с низкой способностью растительности к самовосстановлению.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект #24-77-10055).

Slukovskaya, M.; Dvornikov, Y.; Ivanova, T.; Kopeina, E.; Petrova, A.; Shirokaya, A.; Novikov, A.; Ivanova, L.; Kremenetskaya, I. Topographic Wetness Index as a Factor of the Toxic Metals' Accumulation by the Alkaline Sorption Barrier and the Choice of Revegetation Strategy in the Subarctic. *Soil Syst.* 2025, 9, 52. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020052>

Материалы
VI Российского Совещания по глинам и глинистым
минералам – ГЛИНЫ-2025

СЕКЦИЯ С1: КРИСТАЛЛОХИМИЯ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ И СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

К вопросу раздельного определения аморфной и кристаллической форм кремнезема в горных породах

**П.Е. Белоусов¹, Б.В. Покидько¹, А.А. Журавлев²,
Т.А. Королева¹, В.В. Крупская¹**

Минералы кристаллического и аморфного диоксида кремния составляют значительную часть земной коры. Наиболее распространенным представителем таких соединений является кварц - породообразующий минерал большинства горных пород, который может слагать как самостоятельные пласты (песок, песчаник, кварцит и т.п.), так и присутствовать в виде примесей практически во все типах индустриального сырья, включая и глинистые породы. Помимо самого кварца, в породах могут присутствовать и его полиморфные разновидности, например, кристобалит и тридимит. Основным методом их количественной диагностики является рентгенодифракционный анализ. Однако, как показали текущие исследования, помимо кристаллических форм кремнезема, в горных породах различного генезиса может присутствовать значительное количество аморфной кремнистой или алюмокремнистой фазы. В особенности это касается пород вулканогенной природы, образовавшихся либо в результате гидротермальных преобразований, либо на стадии диагенеза за счет девитрификации исходных вулканических пеплов в щелочной среде. Аморфный кремнезем может накапливаться как на основном этапе минералообразования, так и в результате вторичных преобразований и более поздних этапах развития геологических процессов.

Диагностика аморфного кремнезема значительно осложнена вследствие того, что он не определяется количественно при помощи стандартных методов рентгенодифракционного анализа. Аналогичным образом возникают проблемы при количественном минеральном анализе силицитовых пород (диатомит, трепел, опока), состоящих как из кристаллических, так и аморфных форм диоксида кремния.

Различными исследованиями было показано, что даже небольшая примесь аморфной кремнистой фазы в горных породах может оказать существенно влияние на технологические свойства промышленного сырья. Так, например, присутствие аморфного кремнезема в бентонитовых глинах, влияет на их реологические свойства (Lagaly, Ziesmer, 2003), а его же присутствие в цеолитах – на сорбционные свойства. Понимание наличия или отсутствия аморфного кремнезема в породах также позволяет судить об условиях образования месторождений и особенностях их строения.

¹ИГЕМ РАН, Москва, pitbl@mail.ru

²МГРИ-РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, Москва, anton.zhuravlev.0202@mail.ru

Большинство существующих методик определения аморфного/растворимого/коллоидного кремнезема относятся к государственным стандартам и разработаны с целью контроля качества при производстве строительных материалов (ГОСТ 8269.0-97 и ГОСТ 5382-2019). Предложенные методы основаны на определении диоксида кремния, переходящего в водную фазу в виде низкомолекулярных растворимых соединений в результате щелочной обработки исследуемого образца при повышенной температуре. Таким образом, при определении кремнезема основной акцент делается не на определение точной минералогической формы диоксида кремния, но на эмпирическую растворимость в условиях, соотносящихся с технологией применения сырья. В указанных условиях помимо аморфного кремнезема в той или иной степени происходит растворение прочих изоморфных разновидностей кварца. Кроме того, в условиях определения вполне можно ожидать выщелачивания кремния из кристаллической структуры присутствующих в образце алюмосиликатов таких как полевые шпаты, глинистые минералы и т.д.

В ходе настоящей работы были проведены систематические исследования различных методик обработки широкого ряда разновидностей кремнистых и глинистых пород. Эксперименты проводились в том числе на обогащенном кварцевом и полевошпатовом сырье, кристобалите, обсидиане, трепеле и химически чистом аморфном кремнеземе (рис. 1). В рамках работы были исследованы различные условия обработки минерального сырья в щелочной среде (концентрация щелочи, температура, время обработки). Растворимый кремнезем отделялся от нерастворимой фазы центрифугированием, содержание диоксида кремния в надосадочной жидкости после обработки определялось спектрофотометрически с использованием молибдатного метода (Eiler, 1982).

Полученные результаты свидетельствуют, что при щелочной обработке, в соответствии с условиями ГОСТ 8269.0-97 и ГОСТ 5382-2019, происходит частичное растворение глинистых минералов, полевого шпата и кварца, а также растворение аморфного кремнезема (вплоть до 100%) в зависимости от условий обработки сырья.

В результате проведенных исследований была подобрана научно-обоснованная методика, представляющая собой модификацию существующих, которая позволяет выделить и количественно определить водорастворимый аморфный кремнезем в породах, минимизировав при этом воздействие на структуру слоистых и каркасных алюмосиликатов и кристобалита, и полностью исключив растворение кварца.

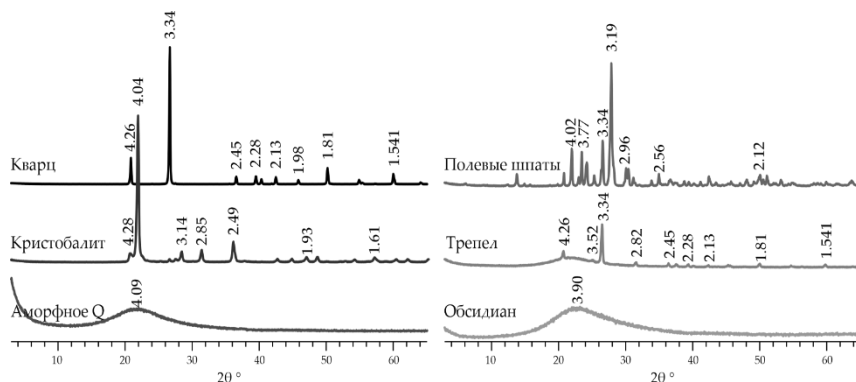


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы исследуемых образцов

Работа проведена в рамках темы Госзадания ИГЕМ РАН.

Lagaly G., Ziesmer S. Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersion // Advances in colloid and interface science. 2003. V. 100-102, P. 105-128.

ГОСТ 8269.0-97. «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний».

ГОСТ 5382-2019. «Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа».

Eiler R.K. Chemistry of Silica. Moscow: Mir, 1982, part 1, 416 p., part 2, 1127.

Диагностика структурно-минералогических особенностей глинистого сырья Урало-Сибирского региона

Т.В. Вакалова¹, В.И. Верещагин¹

Комплексная оценка свойств глинистого сырья предполагает определение целого ряда показателей, таких как химического, гранулометрического, вещественного составов, особенностей структуры глинистых и примесных минералов, физико-химических и технологических свойств глинистых пород.

Систематизация обширного накопленного экспериментального материала по исследованию и использованию глинистых пород Урало-Сибирского региона свидетельствует о том, что они представлены практически всеми видами глинистого сырья: каолинами, беложгущимися пластичными и сухарными огнеупорными глинами, светложгущимися тугоплавкими и красножгущимися легкоплавкими глинами и суглинками, обладающими различными технологическими свойствами и перспективными практически для всех видов керамических материалов (Вакалова и др., 2003).

Глинистые породы имеют сложный вещественный состав, состоящий из смеси глинистых и неглинистых минералов. Все важнейшие физико-химические и технологические свойства глинистых пород определяются главным образом природой и содержанием именно глинистой составляющей. Диагностика минералогии «глинистого вещества» достаточно сложна, трудоемка и возможна только с привлечением комплекса современных физико-химических методов исследования, уровень возможностей которых (рентгеновского, термического, микроскопического, ИК-спектроскопии и др.) позволяет с достаточной степенью вероятности определять на качественном уровне отдельные глинистые минералы, принадлежащие к различным типам, в смесях даже дискретных частиц или межслойных сростаний. Однако, если эти глинистые минералы принадлежат к одной группе, то их идентификация становится достаточно проблематичной. В наибольшей степени это касается таких распространенных минералов огнеупорных глин как каолинит и галлуазит, особенно, если галлуазит представлен разновидностями с разным содержанием химически связанной воды.

Для количественного определения вещественного состава глинистых пород и установления типа глинообразующих минералов авторами предложено использовать дробный (рациональный) химический анализ. Разработана схема проведения дробного химического анализа глинистого сырья, которая позволяет определять химический состав тонких фракций; количество и состав обменных катионов; растворимых в воде солей;

¹ТПУ, Томск, tvv@tpu.ru

карбонатов; количество аморфного кремнезема и свободного кварца; количество и состав минералов-коллоидов (Vakalova et al, 2018). Для качественной и количественной оценки содержания в глинах аморфизированной составляющей предлагается новый эффективный способ извлечения коллоидов путем обработки глинистых фракций реактивом Тамма (буферной смесью из щавелевой кислоты и щавелевокислого аммония с рН, равным 3,25). На основании проведенных химических определений расчетным способом определяются содержание гидрослюда (по содержанию обменного оксида калия) и химический состав глинистого остатка. Это позволяет установить тип порообразующего минерала, рассчитать структурную формулу глинистого минерала, прогнозировать физико-химические и технологические свойства глин.

Исследование вещественных составов глинистого сырья Урало-Сибирского региона методом рационального химического анализа позволило определить качественный и количественный минералогический состав в зависимости от его групповой принадлежности (Вакалова Т.В. 1997, 2002). В частности, в тонкодисперсной (менее 5 мкм) части огнеупорных беложгущихся глин основным глинообразующим минералом выступает каолинит (до 60 %), иногда с примесью гидрослюда (не более 5–10 %), тонкодисперсного кварца (до 10 %) и коллоидных веществ (до 10–12 %). Грубодисперсная часть (20–30 %) сложена преимущественно кварцем (до 10–15 %), полевыми шпатами (до 10–15 %) и незначительной примесью железистых и карбонатных минералов. Тугоплавкие светлоокрашенные глинистые породы представляют собой гидрослюдистое (до 30–35 % гидрослюда) сырье с примесью каолинита (до 10–12 %), а в непластичной части помимо кварца (до 10–15 %) и полевых шпатов (до 6–8 %) присутствуют примеси железистых (до 2,5 %) и карбонатных (до 5 %) минералов.

На настоящий момент достоверно доказано, что физико-химические и технологические свойства глин определяются не только их минеральным составом, но и степенью кристалличности глинообразующих минералов. Нарушения кристалличности в той или иной степени специфичны для всех глинистых минералов. В большей степени они характерны для монтмориллонитов, в меньшей – для минералов каолинитовой группы.

Расчет структурных формул порообразующих глинистых минералов в исследуемых глинах, проведенный на основе установленных химических составов глинистого вещества и состава обменных катионов, выявил наличие изоморфных замещений в структуре каолинита в тетраэдрическом слое, в структуре монтмориллонита – как в октаэдрическом, так и в тетраэдрическом слоях. Необходимо отметить, что расчет структурной формулы несет большую информацию, поскольку позволяет представить не только характер изоморфных замещений в структуре, выявить качественно состав обменных

катионов, но и прогнозировать поведение анализируемой пробы при ее технологической переработке. Например, наличие в составе обменных катионов преимущественно катиона кальция Ca^{+2} делает этот легкоплавкий суглинок монтмориллонитовой природы практически ненабухающим. При значительном замещении катиона кремния Si^{+4} на Al^{+3} при обжиге в качестве одной из высокотемпературных фаз можно ожидать образование алюмокремниевой шпинели, изоморфные замещения в октаэдрическом листе Al^{+3} на Fe^{+2} и Mg^{+2} , наличие Al^{+3} в четверной координации, а также значительная замена кислорода на гидроксильную группу повышает активность глины при спекании.

Таким образом физико-химические и технологические свойства глинистого сырья определяются не только содержанием и минеральным типом глинистой составляющей, но и степенью совершенства структуры глинообразующих минералов, а также вещественными составами тонкодисперсной (менее 5 мкм) неглинистой составляющей (содержанием тонкодисперсного кварца, качественным и количественным составом растворимых солей, обменных оснований, аморфизированной составляющей) и более грубых (более 5 мкм) непластичных примесных включений (кварца, карбонатов, железосодержащих минералов и др.), знание которых позволяет определиться с путями регулирования основных свойств глинистых пород с целью доведения их до необходимого уровня.

Вакалова Т.В. Природа сухарности и пластичности огнеупорных глин Трошковского месторождения / Т.В. Вакалова. Стекло и керамика. 1997. 11, 23 - 26.

Вакалова Т.В. Характеристика глинистого сырья Сибирского региона и оценка его качества / Т.В. Вакалова, В.М. Погребенков // Стекло и керамика. 2002. 12, 23 – 27.

Вакалова Т.В. Огнеупорные глины Сибири / Т.В. Вакалова, В.И. Верещагин, В.М. Погребенков // Новые огнеупоры. 2003. 5, 105 - 110.

Vakalova T.V., Pogrebenkov V.M., Vereshagin V.I., Khabas T.A., Revva I.B. Optimising rational chemical analysis for quantitative determination of the composition of clay in soils. Applied Clay Science, 2018. DOI: 10.1016/j.clay.2018.07.014

Прикладная топоминералогия глин в россыпях алмазов при поисках их коренных источников на примере палеокарстов Накынского кимберлитового поля

И.И. Никулин¹

Минеральный состав дяхтарской толщи нижней юры, сложенной отложениями палеоделювия и палеокарстов, изучен в непосредственной близости и на удалении от кимберлитовых трубок (Никулин и др., 2024). Минералы со структурными неоднородностями (смешанослоистые) обнаружены в разрезах шлейфов размыва выветрелых разностей кимберлитовых пород. Мощность отложений с такими минералами резко сокращается на расстояниях более 2 км от коренного кимберлитового тела.

Значительные концентрации легких редкоземельных элементов (La, Nd), флюидно-подвижных элементов (Li, As, S, Sr) и других несовместимых элементов (Zr до 850, Nb до 75 г/т) позволяют предположить, что глины образовались благодаря взаимодействию горячих гидротермальных флюидов (до 400° С), богатых кремнием и холодных метеорных (возможно, морских) вод. Это выражается в соотношении гидрослюдистого компонента к смектитовому менее 15 и концентрации лития более 150 г/т. Вероятно, самостоятельная гидрослюда 1М обусловлена в основном деградацией флогопита из-за выноса двухвалентных металлов, поэтому наследует свойственный ему политип 1М. Разнообразие слоистых силикатов обусловлено тем, что в результате постмагматических процессов, флюиды, поступившие по кимберлитовым конгломератам и карбонатным трещинам ордовикского кимберлитовмещающего цоколя, преобразовывали смектиты в гидрослюды. С процессами выветривания связаны структурные неоднородности типа каолинит-монтмориллонитового ССМ. Подобные индикаторные признаки нами выявлены и в россыпях алмазов Предуральяского прогиба (Никулин, Коробков, 20218).

Глинистый материал в дяхтарской толще, слагающий цементирующую массу пород различного генезиса, имеет широкий спектр химизма и разнообразный минеральный состав (рис. 1). Повсеместно встречается иллит (до 30%) и смешанослойное каолинит-монтмориллонитовое образование (до 65%). Реже и в меньших количествах присутствуют хлорит (15-30%) и минералы группы монтмориллонита-сапонита (смектиты) (15-20%). Помимо этого, установлено, что даже в однородных глинистых породах встречаются буровато-коричневые реликты продуктов изменения флогопитовых слюд. По-видимому, это связано с быстрым кратковременным захоронением выветрелой породы вместе с неизмененными обломками при обвале в полость

¹ИГЕМ РАН, Москва, iinikulin@gmail.com

карстовой воронки. Аномальные концентрации триоктаэдрических смектитов (до 45%), хлоритов (смесь кристаллохимических разновидностей Ib ($\beta=90^\circ$) и IIb ($\beta=97^\circ$)) и наличие серпентина отмечаются в карстах, сформированных в непосредственной близости к кимберлитовому телу (до 200-400 м), а смесь хлоритов Ib и Ia – к тектоническим нарушениям. Пестрота окрасок глин зависит от химического состава выветрелого субстрата.

Минералы группы смектита уверенно идентифицируются на рентгеновских дифрактограммах по рефлексам $d_{060} \approx 1,53 \text{ \AA}$ (параметр $b \approx 9,18 \text{ \AA}$) и d_{001} с межплоскостным расстоянием $14,0\text{--}14,8 \text{ \AA}$, который при насыщении препарата глицерином смещается до $18,3 \text{ \AA}$. Прокаливание образцов в течение 2 часов при 550° приводит к уменьшению значений диагностического рефлекса минерала до $\approx 9,5 \text{ \AA}$. Термограммы смектитов характеризуются после проявления первого эндоэффекта $100\text{--}150^\circ$ дополнительным перегибом около $170\text{--}200^\circ$, присущим магнезиальным разновидностям. Триоктаэдрическая разновидность регистрируется по наличию рефлексов $d_{001}=16,35 \text{ \AA}$ и $d_{060}=1,549 \text{ \AA}$. На предварительно прокаленных образцах (при $t=600^\circ$) в течение 2 часов, содержащих триоктаэдрический смектит, проявляется рефлекс d_{002} . Его интенсивность относительно d_{001} не превышает 15 отн. ед., что является диагностическим признаком триоктаэдрической разновидности смектитов – сапонита.

Глинистыми минералами, образованными в результате разрушения кимберлитов и отложенных в нижнеюрских алмазоносных отложениях фаций ближнего сноса дяхтарской толщи, являются сапонит, серпентин (лизардит, хризотил) и хлорит IIb; в укугутской свите – серпентин «А» и хлорит IIb. Идентификация этих минералов и вынесение на картах с изопахитами сходных по вещественному составу в качестве индикаторов, предлагается как инновационный метод оптимизации поисков коренных и россыпных источников алмазов.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для более эффективного поиска коренных источников алмазов в Западной Якутии. Картирование выявленных особенностей в минеральном составе перекрывающих кимберлитовые трубки отложения могут использоваться как новые поисковые признаки алмазоносности при геологоразведочных работах на коренные источники алмазов. В итоге применение минералогических карт с информацией о распространении глинистых минералов – индикаторов кимберлитов (ГМИК) – позволит усилить поисковые работы на коренные источники алмазов – кимберлиты.

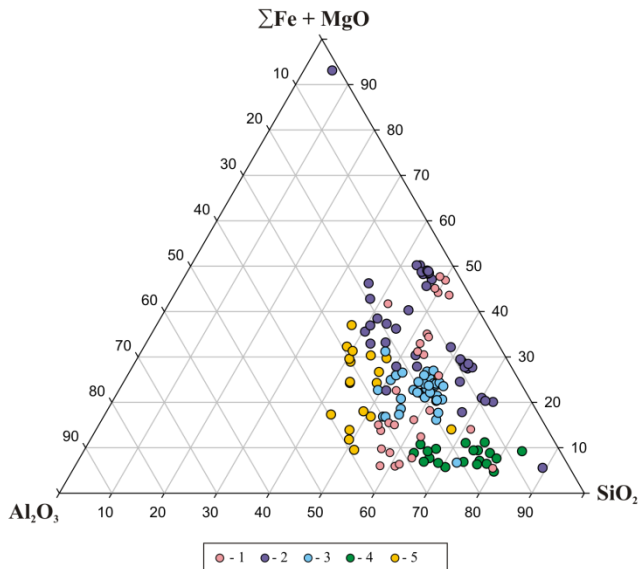


Рис. 1 Сравнительная диаграмма химического состава тонкой фракции дяхтарской толщи с продуктами выветривания различного генезиса.

Примечания. 1 – дяхтарская толща Накынского кимберлитового поля (28 анализов). Коры выветривания: 2 – по кимберлитам (40 анализов); 3 – по долеритам (36 анализов); 4 – по терригенно-карбонатным породам ордовика (20 анализов); 5 – по туфам и туфогенным породам (20 анализов)

Никулин И.И., Боева Н.М., Бортников Н.С. Структурные неоднородности литиеносных слоистых силикатов палеокарста кимберлитов и их поисковое значение (Среднемархинский алмазоносный район, западная Якутия). Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 517. № 1, С. 769-783. DOI 10.31857/S2686739724070114. – EDN BCEDJM.

Никулин И.И., Коробков И.Г. Некоторые особенности вещественного состава гигантских алмазоносных палеокарстов западного склона Урала. Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения : Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ - НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, 29 мая – 01 2018 года / Акционерная компания «АЛРОСА» (публичное акционерное общество), Научно-исследовательское геологическое предприятие (НИГП). – Мирный: Акционерная компания "АЛРОСА" (публичное акционерное общество). 2018, С. 133-136. EDN YRYQMH.

Титаносиликатные слюды: миграция ионов, ионный обмен и DFT-моделирование и геометрический анализ

**Т.Л. Паниковський¹, Г.О. Калашникова¹, Н.А. Кабанова¹,
С.В. Кривовичев¹**

По определению Н.В. Белова слоистые титаносиликаты, основу кристаллической структуры которых составляют трёхслойные пакеты (два гетерополиэдрических и один октаэдрический), можно отнести к специальной группе минералов – титаносиликатных слюд (Белов, 1976). Один из наиболее распространённых минералов из этой группы – мурманит (Рис.1). Минерал был впервые описан Н.Н. Гутковой, а его кристаллическая структура расшифрована А.Д. Халиловым с соавторами (Гуткова, 1930; Халилов 1965).

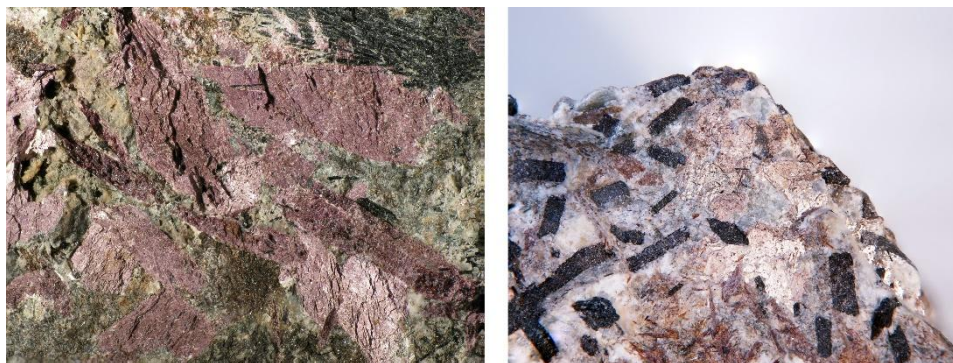


Рис. 1. Титаносиликатные слюды: Мурманит (слева), гидратированный аналог мурманита (справа)

Мурманит, $\text{Na}_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, акцессорный и второстепенный минерал в породах Ловозерского щелочного массива, наиболее распространенный в лейкократовых породах, в особенности в контактовых зонах фойяитов и уртитов. Мурманит широко распространен в мурманитовых порфириовидных луявритах, образующие жиллоподобные и пластообразные тела. Одна из особенностей мурманита – широкое разнообразие химического состава, преимущественно вариации количества H_2O (Герасимовский 1936). Нами детально исследованы как природные образцы мурманита, так и лабораторно смоделированы механизмы ионной миграции и посткристаллизационных превращений в мурманите. Также осуществлён ионный обмен катионов Cd^{2+} , Pb^{2+} и проведено моделирование

¹ ФИЦ КНЦ РАН, Anamuty, t.panikorskii@ksc.ru

путей миграции катионов, а также выполнен DFT-оптимизация Pb- и Cd-замещённых структура мурманита.

Для оценки энергетических характеристик диффузии в структуре мурманита был использован метод BVSE. Была проведена оценка фактора стабильности GII (Global Instability Index) и определен энергетический профиль активационного барьера. Установлено, что для структуры мурманита $GII=0.2$ и соответственно она является достаточно стабильной. Энергетические барьеры Na^+ -диффузии для 1D миграции значительно ниже, чем для 2D и 3D миграции (Рис. 2).

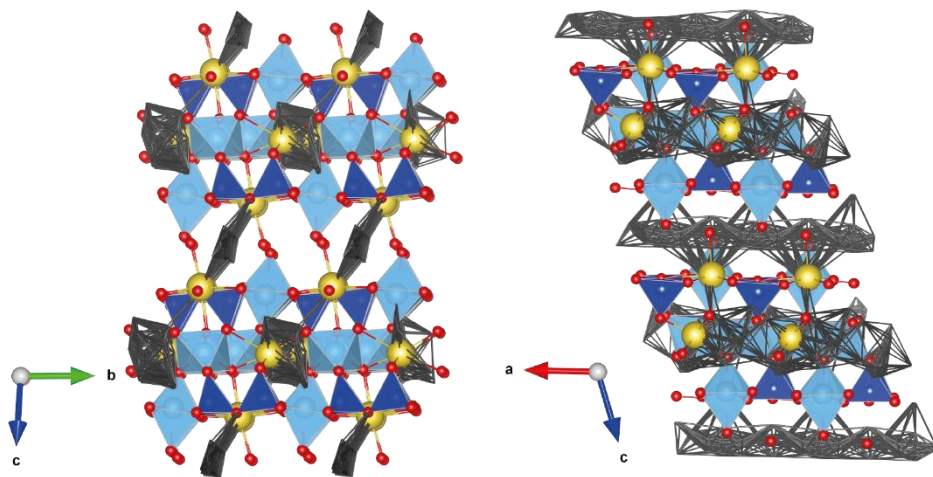


Рис. 2. Пути миграции Na мурманите, рассчитанные в программном комплексе ToposPro

Следует отметить, что теория валентных усилий не учитывает кулоновское отталкивание между рабочими ионами, что приводит к определенной неточности результатов. Значения энергетических барьеров, полученные при помощи программы softBV зачастую занижены по сравнению со значениями, полученными при экспериментальных исследованиях. Однако, в предыдущих исследованиях нами были установлены условные диапазоны значений для энергетических барьеров, рассчитанных при помощи BVSE подхода: 0–0.80 эВ – высокая ионная проводимость, 0.80–1.20 эВ – низкая ионная проводимость, > 1.20 эВ – очень низкая ионная проводимость. Таким образом, можно заключить, что для мурманита будет наблюдаться высокая ионная проводимость в направлении [100] ($E_m(Na^+)1D = 0.28$ эВ), но по всему объему структуры ионная проводимость будет низкой ($E_m(Na^+)3D=1.16$ эВ). Значения энергетических барьеров для диффузии ионов H^+ ниже, чем для

Na⁺, из чего можно сделать вывод и возможной дополнительной высокой протонной проводимости.

Нами установлено, что H₂O-обогащённая разновидность мурманита образовалась в результате посткристаллизационного преобразования исходного мурманита по схеме $2\text{Na}^+ + 2\text{O}^{2-} \leftrightarrow 2\Box + 2(\text{OH})^-$. Геометрически протекание ионообменной реакции возможно, энергетические барьеры миграции Na в мурманите соответствуют ионному проводнику. Рассчитанные ИК-спектры Pb- и Cd-замещённого мурманита с помощью DFT-анализа близки к экспериментальным, что позволяет сделать выводы о правильности моделей кристаллических структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания FMEZ-2025-0046.

Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. М.: Недра 1976. 344 с.

Гуткова Н.Н. Новый титаносиликат - мурманит из Ловозерских тундр. Доклады Академии Наук. 1930. серия А. 731-736.

Герасимовский В.И. Мурманит Ловозерских тундр. Редкие металлы. 1936. 4. 37-39.

Халилов А.Д., Макаров Е.С., Мамедов Х.С., Пьянзина Л.Я. О кристаллической структуре минералов группы мурманита – ломоносовита ДАН СССР, 1965. 162. 1. 179-182

Сорбционные и каталитические свойства семикатионного слоистого двойного гидроксида состава $\text{MgNiCo}/\text{AlFeYGD}$

Е.С. Селиверстов¹, Е.В. Храмов², О.Е. Лебедева¹

Слоистые двойные гидроксиды (СДГ), известные также как гидроталькитоподобные вещества или анионные глины, представляют собой большую группу слоистых соединений (Cavani, 1991). По своей природе это основные соли, в состав которых входят минимум два катиона разновалентных металлов и практически любые анионы. Типичным представителем группы, давшим ей название, является гидроталькит – природный минерал, гидроксокарбонат магния и алюминия. В последние годы привлекают внимание синтетические СДГ, содержащие большое количество (6-10) катионов металлов различной природы. Особый интерес вызывает состояние металлов переменной валентности в таких образцах.

В настоящем исследовании путём мягкой механохимической активации с последующей мягкой гидротермальной обработкой был получен новый семикатионный СДГ состава $\text{MgNiCo}/\text{AlFeYGD}$. Образец продемонстрировал фотокаталитическую и сорбционную активность по отношению к модельному красителю метиловому оранжевому, а также активность в 3,3',5,5'-тетраметилбензидиновом (ТМБ) тесте.

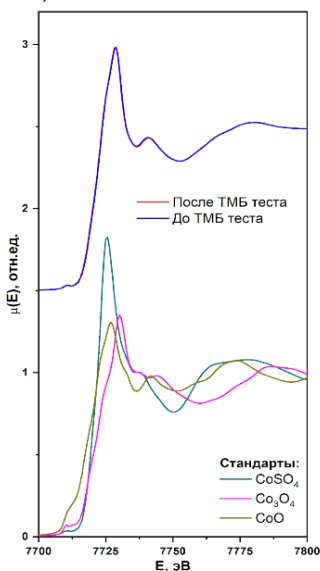


Рис. 1 Спектр XANES на К-крае Co образцов СДГ в сравнении со стандартами

¹НИУ «БелГУ», Белгород, seliverstov.evgeniy.s@gmail.com

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, evxramov@gmail.com

По данным XANES-спектроскопии, катионы кобальта в составе кристаллической решётки образца представлены смесью двух- и трёхзарядных, причём данное соотношение устойчиво, и не изменилось после проведения ТМБ теста (рис.1, графики до и после ТМБ теста полностью накладываются друг на друга).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-23-00182.

Авторы благодарят центр коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ» за предоставленную возможность использования приборной базы и консультации специалистов; К. С. Ерохина и Отдел структурных исследований ИОХ РАН за исследование образца методом рентгеновского микроанализа.

Cavani F., Trifirò F., Vaccari A. Hydrotalcite-type anionic clays: Preparation, properties and applications. Catalysis today. 1991. 11, 173-301.

Гидротермальный синтез Ge-содержащего аналога парагонита

**Т.В. Сеткова¹, Л.А. Горелова², Т.М. Бубликова¹,
О.С. Верещагин², Е.С. Захарченко¹, А.В. Спивак¹**

Минералы группы слюд – порообразующие слоистые силикаты, широко распространенные в метаморфических, интрузивных и осадочных горных породах (Fleet, 2003). Применение слюд в различных областях техники определяется уникальными свойствами этой группы минералов, такими как термическая и радиационная стойкость, высокие электроизоляционные показатели и малая гигроскопичность (Elmi, 2023; Oliveira et al. 2024). Целью данной работы является проведение поисковых экспериментов по синтезу изоструктурных слюдам соединений, не имеющих аналогов в природе. Одним из таких соединений является германиевый аналог парагонита.

Эксперименты по синтезу Ge-содержащего аналога парагонита проводили в золотых ампулах (объем 2 см³) при температуре 600 °С и давлении 150 МПа в установке высокого газового давления (УВГД). В качестве шихты использовали смесь оксидов алюминия и германия. Ампулу, заполненную шихтой, заливали щелочным раствором (7 мас. % NaOH) в соответствии с коэффициентом заполнения (Wagner, 2002), заваривали и помещали в УВГД. Продолжительность синтеза составила 8 дней.

Полученные кристаллы изучали с помощью оптического (МБС-10) и поляризационного (Nikon Eclipse LV100pol) микроскопа. Идентификацию фаз проводили на основе порошковых рентгенограмм с использованием дифрактометра Bruker D8-advance. КР спектры получены на спектрометре Renishaw (RM1000). Морфологию и состав исследовали на сколах и полированных поверхностях образцов с использованием растрового сканирующего микроскопа Tescan Vega II XMU с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) INCA Energy 450.

В результате экспериментов получены пластинчатые кристаллы размером от 50 до 1000 мкм. Морфологические особенности указывают на совершенную спайность полученных кристаллов (рис. 1а). Химический состав (Na₂O 5.71%, Al₂O₃ 27.78%, GeO₂ 57.85%) близок составу парагонита (идеальная формула NaAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂), в структуре которого позиция кремния полностью замещена германием. Кристаллы характеризуются моноклинной симметрией (C2/c пр.гр.) с параметрами элементарной (ПЭЯ) ячейки: $a = 5.22016(18)$, $b = 9.0821(3)$, $c = 19.6458(7)$ Å, $\beta = 94.915(3)^\circ$, $V = 927.99(6)$ Å³.

¹ИЭМ РАН, Черноголовка, setkova@iem.ac.ru

²СПбГУ, Санкт-Петербург, gorelova.ljudmila@gmail.com

Установленные ПЭЯ значительно выше значений параметров природного парагонита и ниже для ранее синтезированных NH_4 - и K-германиевых слюд (Barrer, 1966).

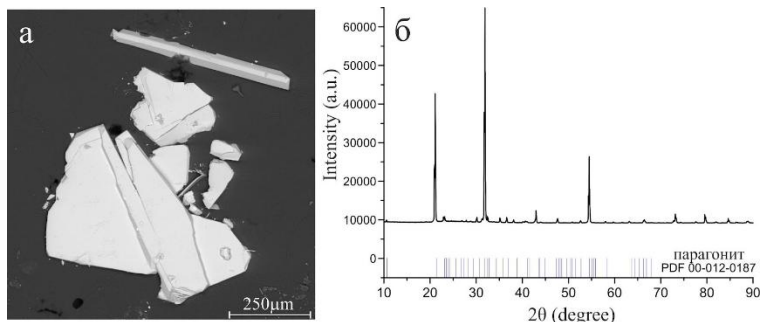


Рис. 1. РЭМ-изображение (а) и дифрактограмма (б) синтезированных кристаллов

КР-спектр синтезированных кристаллов имеет схожую топологию со спектром парагонита (Tlili et al., 1989), однако характерные полосы для минералов группы слюд в диапазоне $500\text{--}800\text{ см}^{-1}$ сдвинуты в область низких частот на $\sim 100\text{ см}^{-1}$. Этот сдвиг может быть вызван присутствием более крупного катиона германия по сравнению с кремнием в структуре парагонита. В высокочастотной области присутствуют полосы характерные для колебаний ОН групп.

Таким образом, методом гидротермального синтеза при температуре 600°C и давлении 150 МПа были получены кристаллы $\text{NaAl}_2(\text{AlGe}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ размерами до 1000 мкм с совершенной спайностью. По морфологии, химическому составу, а также данным порошковой рентгеновской дифракции и КР-спектроскопии полученные кристаллы можно отнести к Ge-аналогу парагонита, в структуре которого кремний заменен на германий.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИЭМ РАН № FMUF-2022-0002.

Barrer R.M. and Dicks L.W.R. Chemistry of Soil Minerals. Part III. Synthetic Micaceous Minerals with Substitutions of NH, for K, Ga for Al, and Ge for Si. Inorg. Phys. Theor., J. Chem. Soc. (A). 1966. 1379-1385.

Elmi C. Physical-Chemical Properties of Nano-Sized Phyllosilicates: Recent Environmental and Industrial Advancements. Encyclopedia. 2023. 3(4), 1439-1460.

Fleet M.E., Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. Rock-forming minerals: micas. Geological Society of London, London. 2003. 758p.

Oliveira L.H., França D.B., Moraes A.I.S., Medina-Carrasco S., Fonseca M.G., Osajima J.A., da Silva-Filho E.C., Orta M.M. An overview about synthetic high charge micas and their uses. Applied Clay Science. 2024. 251, 107325.

Tlili A., Smith D.C., Beny J.M., Boyer H. A Raman microprobe study of natural micas. Mineralogical Magazine. 1989. 53, 165-179.

Wagner W., Pruss A. The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. 31(2), 387p.

О некоторых особенностях внутрикристаллического набухания монтмориллонита

Р.М. Усманов¹, М.Г. Храмченков²

Обнаружена новая особенность внутрикристаллического набухания монтмориллонита, заключающаяся во взаимном перемещении глинистых частиц (силикатных слоев) в кристаллитах и микроагрегатах монтмориллонита при набухании с образованием новых пор между глинистыми частицами, образующими кристаллиты и агрегаты (Храмченков М.Г. и др., 2023). Это явление было экспериментально исследовано с использованием методов статической влагоемкости и мессбауэровской (ядерного гамма-резонанса) спектроскопии. Образцом служила полиминеральная глина, содержащая 32% МК (смесь монтмориллонита (ММ) и смешанослойного смектит-иллитового (ГМ) образования с преобладанием ММ). Анализ, выполненный на порошке исходной воздушно-сухой глины методом статической влагоемкости при некоторых влажностях воздуха, показал, что в парах воды гидратация кристаллитов МК идет преимущественно на базальных поверхностях в форме внутрикристаллического набухания (находился коэффициент $K=1,498$, $K=w(0,92\%)/w(0,43\%)$, w – влажность воздуха (%)). После обработки этой глины раствором хлорида натрия, а затем промывки водой глина набухала в специальной ячейке с жесткими стенками, т. е. в условиях ограниченного объема. После заполнения всего объема ячейки глину извлекали, сушили на воздухе, растирали до порошка, навески помещали в эксикаторы, где поддерживалось заданное давление паров воды. После достижения равновесия оказалось, что гидратация глинопорошка этого образца в сравнении с исходной глиной при одинаковых давлениях паров воды возросла в 2,8 – 2,9 раза. При этом основная масса воды была поглощена в микрокапиллярах (коэффициент $K=3,82$), и лишь одна треть воды была адсорбирована с образованием гидратного прослоя на базальных поверхностях кристаллитов. Таким образом, солевая обработка раствором хлорида натрия с последующей отмывкой свободных солей привела к резкому изменению структуры глинистых частиц. Эта структура оказалась фиксированной в подсохшей глине даже после ее растирания до порошка, т. е. в зернах размером менее 0,1 мм. Второй эксперимент был проведен в ячейке со «свободным» объемом в условиях приложения к глине постоянного давления, причем изменения общего объема выявлено не было. Образование структур типа «раскрытого веера» имело место в меньшей степени, поскольку при этом

¹КФУ, Казань, almightyhero@mail.ru

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, mkhramch@gmail.com

в порошках заметно снизилось капиллярное поглощение воды (коэффициент $K=3,02$). Третий эксперимент также проводился в кювете с изменяющимся объемом, но последовательность промывки изменилась – первоначально в глину вводили воду, а затем раствор хлорида натрия, как и в первом опыте. Изменение общего объема выявлено не было. В этом случае в подсушенном глинопорошке микропористость, как и ожидалось, проявилась в еще меньшей степени.

Таблица 1. Результаты измерения содержания воды (в граммах на 100 г сухого образца) в образцах глины для различных значений влажности (Миндюшское месторождение РТ, Россия)

Влажность	43%	92%	93%
Образец 1	5,21	19,90	36,44
Образец 2	6,05	18,30	26,85
Образец 3	6,32	18,37	36,40
Исходный	6,47	9,69	13,16

Был проведен также специальный эксперимент с применением метода мессбауэровской спектроскопии (рис.1), который также выявил структурно-фазовые различия в трех образцах. Далее, нами был проведен опыт по набуханию: были взяты два образца одной и той же глины из разных месторождений (табл. 2). Первый образец находился при фиксированной влажности, второй подвергался набуханию за счет изменения (роста) влажности в эксикаторе. Затем второй образец доводили до того же значения влажности, что и первый. В конце эксперимента сравнивали удельные поверхности двух изначально одинаковых образцов. Для этого использовали метод адсорбционно-люминесцентного анализа (Эйриш М.В. и др., 1975), позволяющий фиксировать долю базальной поверхности кристаллитов. Было показано, что базальная поверхность глинистых частиц в двух образцах после эксперимента различна (табл. 2). Изменения объема не зафиксировано. Таким образом, показано, что при набухании силикатные слои кристаллитов раздвигаются с образованием новых микропор, как и в первом эксперименте.

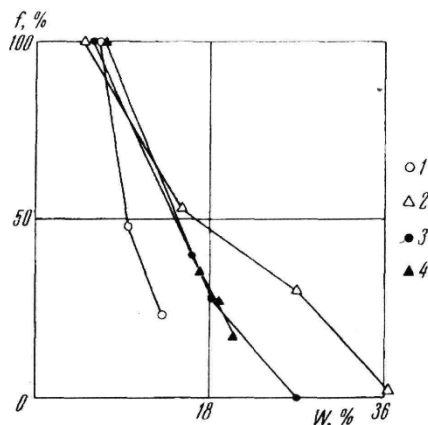


Рис. 1. Затухание относительной интенсивности мессбауэровского сигнала в образцах глины при различной влажности. 1 – исходный образец, 2 – первый образец, 3 – второй образец, 4 – третий образец

Таблица 2. Изменение обменной емкости (ОЕ) и глинистых чисел (Чгл) образцов глины до и после их увлажнения до $w(0,92\%)$. Определения параметров ОЕ и Чгл приводятся в (Эйриш и др., 1975)

Месторождение	Состояние	ОЕ	Чгл
Оглалинское	Начальное	67	291
Огланлинское	Финальное	62	242
Саригюхское	Начальное	77	462
Саригюхское	Финальное	72	410
Березовское	Начальное	47	43
Березовское	Финальное	52	78

Храмченков М.Г., Трофимова Ф.А., Усманов Р.М., Долгополов Р.Э. Микроструктурные преобразования набухающих глинистых минералов. Георесурсы, 2023, 25(1), с. 108–118

Эйриш М.В., Бацко Р.С., Двореченская А.А., Иванова А.А., Пшеничная Н.Ф., Солдатова Н.С. Адсорбционно-люминесцентный анализ глинистых минералов с применением органических красителей. Изв. АН Каз. ССР, сер. Геол., 1975, №4, с. 82 – 88.

Материалы
VI Российского Совещания по глинам и глинистым
минералам – ГЛИНЫ-2025

СЕКЦИЯ С2: ГЕОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ГЕНЕЗИС
ГЛИН

Минерально-сырьевая база промышленно важных месторождений глинистого сырья России

П.Е. Белоусов¹

К промышленно важным месторождениям глинистого сырья относятся те месторождение, которые обеспечивают сырьевую базу для нужд промышленности и сельского хозяйства. Для подобного сырья характерны существенные объемы добычи. Отсутствие зависимости от его импорта и постоянный прирост запасов является стратегически важной задачей. К подобному глинистому сырью можно отнести бентонитовые, огнеупорные и тугоплавкие глины, а также каолины. Объемы добычи данного сырья составляют несколько миллионов в год. На глауконититы, палыгорскиты, вермикулит, слюдистое сырье, галлуазит и прочее глинистое сырье приходится значительно меньшие объемы добычи, не превышающие 100 тыс. т. в год.

Бентонитовые глины в основном применяются в металлургической и литейной промышленности, а также бурении. Объем добычи бентонита близится к миллиону тонн в год. Ориентировочные запасы бентонитовой глины в России составляют 185 млн т категории A+B+C1 и 145,2 млн т категории C2 (Белоусов, Крупская, 2019; Государственный баланс запасов, 2019).

В плане генезиса, в России представлены осадочные и вулканогенно-осадочные бентониты и в меньшей степени гидротермальные. Для бентонитов вулканогенно-осадочного и гидротермального типа характерно высокое качество сырья и сложное геологическое строение месторождений.

В фанерозое на территории современной России проходило несколько наиболее активных геологических этапов бентонитообразования, включающих нижне-каменноугольный, среднеюрский, меловой, палеогеновый и неогеновый периоды. Месторождения осадочного типа связаны с древними плитами, платформами, а также предгорными прогибами, в эпоху стабилизации тектонических движений. Вулканогенно-осадочные месторождения связаны со складчатыми поясами и предгорным прогибами (окраинно-континентальные орогены и прилегающие к ним краевые части платформ на морском шельфе и озерах вулканических областей) в период активного вулканизма. Обычно месторождения вулканогенно-осадочного типа относятся к неоген-палеогеновому возрасту, реже меловому и каменноугольному. Элювиальные месторождения формировались в условиях развития платформ в окраинных (Дистанов и др., 2000). Месторождения гидротермального типа приурочены к окраинно-

¹ ИГЕМ РАН, Москва, pitbl@mail.ru

континентальным орогенам с зонами глубоких разломов, на краях континентальных блоков в эпоху активизации гидротермальных процессов в зонах активного вулканизма.

Каолиновые, тугоплавкие и огнеупорные глины применяются в огнеупорной, керамической, лакокрасочной, бумажной и резиновой промышленности. Всего на балансе РФ числится 84 месторождения тугоплавких глин, 41 месторождение огнеупорных глин и 27 месторождений каолина. Их суммарные запасы составляют порядка 1,3 млрд. т. категории А+В+С1, А Ежегодная добыча составляет более 3 млн т.

Минералогическая классификация каолинсодержащих глин сильно отличается от общепринятой в России геолого-промышленной классификации, которая основана не на минеральном составе глин, а на их промышленных свойствах.

В первую очередь учитывается огнеупорность сырья и его пригодность в керамической и строительной отраслях. В большинстве случаев сырье данного типа представляет собой полиминеральные смеси состоящие из минералов группы каолина, смектита и слюд. В виде примесей присутствуют кварц, полевые шпаты, карбонаты и прочие минералы характерные для терригенных пород. При возрастании содержания минералов группы каолинита возрастает и огнеупорность глин. Напротив, присутствие минералов группы смектита и слюд, а также полевых шпатов, окислов железа и минералов, содержащих щелочные металлы, снижает температуру плавления глины (рис.1).

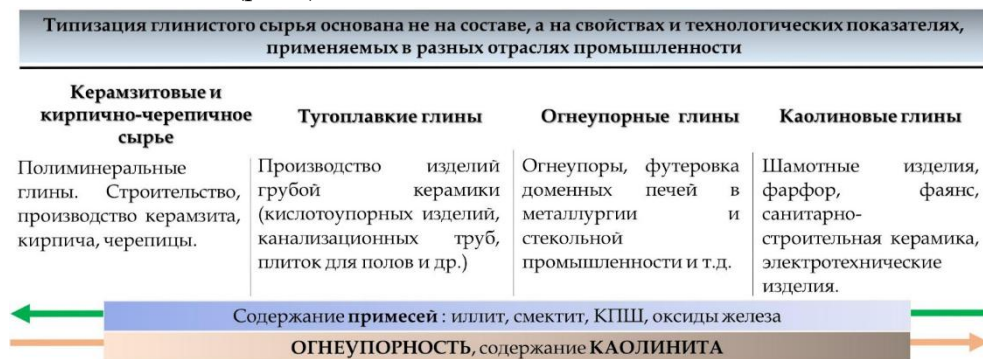


Рис. 1. Геолого-промышленная классификация каолинит-содержащих глин

Механизмы образования каолиновых глин принципиально мало отличаются от прочих глин, однако имеют свои особенности. Выделяют остаточные (первичные), осадочные (вторичные), вулканогенно-осадочные и

гидротермальные каолины. Основным промышленным типом являются месторождения осадочного и остаточного типа.

Остаточные месторождения связаны с корами выветривания (Петров, 1974; Дистанов, 2000). Они имеют площадной характер и крупные запасы сырья. Для образования каолинита остаточного типа важен влажный, жаркий, гумидный климат, наличие кислых лейкократовых магматических пород, например, гранитоидов.

Осадочные месторождения представляют переотложенные первичные глины. В процессе переотложения они значительно разубоживаются терригенным материалом, оксидами железа и зачастую залегают совместно с органическим веществом в заболоченных участках рек.

Вулканогенно-осадочные, или так называемые тонштейны, и гидротермальные каолины имеют не значительное распространение на территории России.

В стратиграфическом плане каолиновые глины в основном приурочены к отложениям каменноугольного, мелового, юрского, неоген-палеогеновый и реже девонского возраста.

На территории России можно выделить три основных провинции, где сконцентрированы основные запасы каолинсодержащих глин: Центральную, Уральскую и Сибирскую.

Работа проведена в рамках темы Госзадания ИГЕМ РАН.

Белоусов П.Е., Крупская В.В. Bentonитовые глины России и стран ближнего зарубежья. Георесурсы, 21(3), 2019, с. 79-90.

Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации: «Глины Bentonитовые», 2019; «Глины для буровых растворов», 2019; «Формовочные материалы», 2019; «Цеолиты», 2019.

Дистанов У.Г. Фанерозойские осадочные палеобассейны России: проблемы эволюции и минерализации неметаллов / У.Г. Дистанов, Е.М. Аксенов, А.А. Сабитов и др. – М.: Изд. Геоинформатика, 2000. – С. 83-96.

Петров В.П. Месторождения каолинов СССР. М.: Недра, 1974.

Геохимические особенности верхнепалеозойских глинистых сланцев Новосибирской области

Л.Г. Вакуленко¹, О.Д. Николенко¹, Н.И. Яндола¹

Водовмещающие горные породы выступают основным природным источником токсичных элементов в подземных водах. Комплексные исследования их проводятся на востоке Новосибирской области, где широко распространены верхнедевонско-нижнекаменноугольные (D₃uk – укропская, D₃pc – пачинская, D₃jur – юргинская свиты; D₃-C₁sm-yar – саламатовская и ярская нерасчлененные толщи, D₃-C₁mz – мозжухинская нерасчлененная серия) глинистые сланцы, представленные темными (темно-серые, до черных, в разной степени углеродистые) и светлыми (зеленовато-, желтовато-серые) разновидностями.

По результатам рентгеноструктурного анализа в составе глинистого вещества темных сланцев установлены: хорошо окристаллизованная диоктаэдрическая слюда 2M₁ мусковитового типа, вероятно, иногда с парагонитом (15-45 % валовой пробы), и Mg, реже Fe-Mg хлорит (5-25 %). Значительную долю составляют тонкодисперсные кварц (20-35 %) и полевые шпаты (10-25 %). В качестве примесей отмечаются сидерит, пирит, пирротин, псиломелан, цеолит (филлипсит), циркон, гранат, амфибол, псевдорутил. В составе глинистого вещества светлых сланцев установлены диоктаэдрическая слюда 2M₁ мусковитового типа (возможно, с участием биотита II стадии выветривания, иногда парагонита) (25-40 %) и смектит (5-15 %). Присутствуют кварц (20-35 %) и плагиоклаз (10-25 %). В качестве примесей отмечены бернессит, пиролюзит, гематит, сидерит, троилит (пирит), пирротин, маггемит, псевдорутил, кордиерит.

Для 54 проб глинистых сланцев был выполнен ИСП-МС анализ (на 63 элемента). Сравнение содержаний малых и большинства породообразующих элементов в исследованных пробах по сравнению с глинистыми сланцами верхней части земной коры (Григорьев, 2009) показывает наличие незначительных (менее, чем в 2 раза) флуктуаций преимущественно в сторону отрицательного отклонения. Содержания Cd, Cs, Ta, W, Tl, U в большинстве проб понижены более чем в 2 раза. Ниже пределов обнаружения, а также ниже на порядок и более содержания Pt, Hg, Re, As, Be (в D₃pc), Au (однако, в 11 образцах разных свит Au в несколько раз больше). Среди всех элементов системно превышают фоновые значения на порядок и более только Se (в 48 пробах) и Te (в 31 пробе). Содержание Ru выше в 2-12 раз в 25 пробах. В целом, наиболее значительные вариации содержаний целого ряда элементов характерны для D₃-C₁mz.

¹ИНГГ СО РАН, Новосибирск vakylenkoLG@ipgg.sbras.ru

Сумма РЗЭ в изученных пробах варьирует от 31,36 до 221,15 г/т, снижаясь в образцах, затронутых процессами гипергенеза (выщелачивание, формирование оксидов-гидроксидов железа и марганца и др.). Среднее значение для всей выборки 146,62 г/т, что несколько ниже такового для глинистых сланцев и аргиллитов (Тейлор, МакЛеннон, 1988), равного 160-180 г/т. Наиболее однородны и повышены средние содержания РЗЭ в D₃jur (175,81 г/т) и в D₃-C₁sm-yar (157,86 г/т).

Для использования геохимических данных при палеогеографических реконструкциях необходимо рассмотреть природу обломочного материала – петрогенного (слабо преобразованного) или литогенного (переотложенного). На диаграмме Zr/Sc-Th/Sc (McLennan et al., 1993) фигуративные точки изученных образцов ложатся преимущественно вдоль линии, отвечающей вариациям состава петрофонда, т.е. обломочный материал в основном не был подвержен переотложению, и литогеохимические данные могут быть использованы для генетической интерпретации. При этом чаще всего восстанавливают состав петрофонда, для чего применяют различные диаграммы (более 20) и элементные индикаторы (более 15).

При реконструкции состава пород источников сноса анализируют также спектры РЗЭ, нормированные по хондриту. Величина дифференциации легких и тяжелых РЗЭ служит мерой соотношения в петрофонде кислых и основных пород. Значения отношения $(La/Yb)_N < 4$ и пологий характер кривых РЗЭ ($(Gd/Yb)_N$ до 1,5) позволяют предполагать существенную роль в источниках сноса магматических пород основного состава. При значении $(La/Yb)_N > 8$ и крутом наклоне указанных кривых предполагается преобладание в источниках сноса пород кислого состава. Для изученных сланцев значения отношения $(La/Yb)_N$ варьируют от 1,76 до 24,26 (среднее 8,63), при этом значения < 4 единичны. Характерен крутой наклон кривых РЗЭ ($(Gd/Yb)_N$ ср. 1,95), несколько выполаживающийся в породах D₃uk (1,52) и D₃-C₁sm-yar (1,75). Наличие отрицательной Eu-аномалии типично для кислых магматических пород ($Eu/Eu^* < 0,85$), в то время как в базальтоидах $Eu/Eu^* > 0,85 - 0,90$ (McLennan, Taylor, 1991). Европиевая аномалия в образцах, изученных сланцев варьирует в пределах 0,39-0,99 (ср. 0,66), при этом четко выражено усиление отрицательной аномалии снизу вверх по разрезу. Выполненные нами построения указывают на то, что в составе пород источников сноса преобладали кислые магматические породы с некоторой долей основных, наиболее заметно проявившихся во время формирования D₃jur, в меньшей степени D₃-C₁mz.

Для определения примеси эксгальционнного материала в породах использовано отношение Ce/La (Стрекопытов и др., 1999), которое в изученных образцах варьирует от 1,5 до 14,76 (ср. 2,32). Его значения, превышающие 2, указывают на преимущественно водородную природу

изученных пород. В отдельные интервалы времени возможно поступление эксталяционного материала, например, во время формирования D_3uk (ср. 1,72) и некоторых уровней в вышележащих свитах. В D_3-C_1mz большая часть образцов характеризуется значениями указанного коэффициента <2 . Об отсутствии гидротермального материала свидетельствует также показатель $Zr/Hf < 50$. В изученных породах его значение варьирует от 21,7 до 48,3 (ср. 37,8), лишь в одном образце достигая 52,8. Значение цериевой аномалии 0,9-1,3 отвечает окраинно-континентальным обстановкам (Murray et al., 1990), характеризующимся отсутствием заметного влияния металлоносных эманаций из срединно-океанических хребтов.

Для определения климатических условий был применён параметр $\Sigma Ce / \Sigma Y$ (отношение суммы легких РЗЭ к тяжелым) (Балашов, 1976). Значения >4 указывают на гумидный климат. В изученных разрезах по изменениям этого значения можно говорить об изменении климата во время формирования верхнедевонско-нижекаменноугольных глинистых сланцев. В целом преобладал аридный климат, иногда сменяемый на семиаридный/семигумидный. При формировании верхнедевонской юргинской свиты преобладал гумидный/семигумидный климат с интервалами аридизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта № 25-17-20024 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 268.

Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 383.

Стрекопытов С.В., Дубинин А.В., Волков И.И. Общие закономерности поведения редкоземельных элементов в пелагических осадках Тихого Океана. Литология и полезные ископаемые. 1999. 2, 133–145.

Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир. 1988. 384.

McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. Geological Society of America. 1993. 21–40.

McLennan, S.M. and Taylor, S.R. Sedimentary Rocks and Crustal Evolution Tectonic Setting and Secular Trends. The Journal of Geology. 1991. 99, 1–21.

Murray, R. W., Buchholtz ten Brink, M. R., Jones, D. L., Gerlach, D. C., & Russ III, G. P. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale. Geology. 1990. 18, 268–271.

Минералогия почв степных блюдцев Северного Прикаспия

Е.Б. Варламов¹, Н.А. Чурилин¹, Р.Э. Мусаэлян¹, А.В. Колесников², А.В. Чурилина³

В лиманных западинах Северного Прикаспия структура почвенного покрова представлена солодами. В свою очередь внутри лиманов в блюдцеобразных депрессиях – степных блюдцах (БС) формируются профили своеобразного строения солоды. Западинные элементы рельефа БС как природные явления обладают комплексом специфических природно-геологических особенностей, знание которых представляет в научном и прикладном значении особый интерес при освоении территорий, пораженных БС. Формирование профилей солодей происходит в результате периодического увлажнения их пресными водами и систематического затопления большей частью в период снеготаяния. Гидрологический режим лимана и БС отличается более длительным периодом увлажнения последних. В летние периоды после снежных зим с аномально высоким снежным покровом наблюдается изменение растительного состава от сухостепных разновидностей до болотных.

Изучено два почвенных разреза в днище БС – солодь мелкая и на его периферийной части – солодь лугово-степная. Почвообразующими породами солодей являются морские слоистые Хвалынские глины, которые отложились на дне бывшего Хвалынского (Каспийского) моря (Макшаев и др., 2023). Обе солоды имеют одинаковую мощность текстурных и аккумулятивно карбонатных горизонтов, но отличаются мощностью осолоделых горизонтов. Солодь БС отличается меньшей мощностью осолоделого горизонта и более высоким содержанием илистых частиц. В профилях солодей преобладающими компонентами являются иллиты и лабильная смешанослойная (СМ) фаза представлена иллит-сметкитами, сметкитом в сопровождении каолинита и хлорита. Схема профильного распределения глинистых минералов обеих солодей элювиально-иллювиальная. Распределения СМ фазы солоды бровки характеризуется одним максимумом в средней части текстурного горизонта, а в БС двумя, в верхней части элювиального и средней текстурного горизонтов. Отличия характеров распределения минералов солоды БС связано с замкнутым характером водного режима, более длительными гидроморфными условиями результатом, которого является мобилизация глинистого материала в пределах указанных горизонтов почвенного профиля. Качественный минеральный состав между почвами практически не отличается. Принципиальным отличием между

¹Москва, ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», evgheni968@rambler.ru

²Московская обл., Одинцовский р-он., с. Успенское. Институт лесоведения РАН

³Москва, НОЦ Ботанический сад Петра I биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

почвами является более высокое содержание СМ фазы и иллита солоди БС. В профилях обеих солодей содержание иллита уменьшается в глубь профиля и возрастает количество смешанослойного иллит-сметкита. В связи с контрастностью увлажнения и более высокой минерализацией водной среды минералогические изменения проявляется в максимальной степени солоди БС. Деградационные изменения глинистых минералов затронули СМ фазу, иллит, хлорит и каолинит. Структурные изменения иллита при развитии процесса осолодения связаны с контрастностью изменения физико-химических условий. В профилях на рентгенографических кривых это проявляется в виде резкого спада или наоборот увеличения интенсивности большей частью 14 и 10-ангстремовых рефлексов. В почвенном профиле БС фиксируется резкий спад 10Å рефлекса в глубь профиля и возрастание 14Å. На сольватированных этиленгликолем препаратах это проявляется в виде тренда возрастания с глубиной интенсивности 17-18 Å рефлекса с асимметрией в область малых углов. Максимальное содержание СМ фазы и смешанослойных иллит-сметкитов фиксируется в текстурном горизонте профиля БС. Увеличение СМ фазы можно объяснить (Кринари и др., 2014) обратной трансформацией иллита в сметкит. В почве БС это проявляется в увеличении вклада разбухающих слоев в общей дифракционной картине рассматриваемой ассоциации минералов. Предполагаем, (Соколова и др., 2005) это связано с изменением блоков слоуд по сторонам базальных поверхностей и со стороны торцевых сколов, с образованием в этих частях промежуточных смешанослойных иллит-сметкитов с разной нормой сегрегации слоев отдельных минералов. Контрастный градиент физико-химических условий среды установлен именно в почве БС в тех горизонтах, где отмечены экстремумы характеристик структурного состояния минералов. Указанные тренды, очевидно генетически связаны с различной степенью деградации в зоне гипергенеза триоктаэдрических слоуд, в СМ фазу и диоктаэдризацией остаточных продуктов и физического дробления пылеватых фракций кластогенных минералов. Фоновое изменение от кислой до щелочной реакции рН почвенного раствора к профилю БС сопровождается увеличением степени замещения Si на Al в тетраэдрических позициях структуры лабильной СМ фазы (Градусов, 1976). При этом дополнительное поступление катиона K⁺ определяет его адсорбцию межслоевыми промежутками разбухающих минералов. В результате этого количество лабильных слоев к поверхности снижается и преобладающими становятся неразбухающие. В условиях периодического переувлажнения в БС установлена аккумуляция глинистого материала в верхней иллювиальной части профиля, а разрушение глинистых минералов отмечено в элювиальном. Это проявляется в сочетании образования вторичных педогенных продуктов

разрушения минералов - аморфных веществ, СМ образований и структур минералов в супердисперсном состоянии.

Таким образом в лиманах Северного Прикаспия при локальном перераспределении поверхностных осадков и формируются западинные формы рельефа - степные блюдца диаметром до 8 м и глубиной до 30-35 см в которых развиваются своеобразного строения солоды существенно отличающиеся от фоновых почв. Илистая фракция в профиле солоды БС по сравнению с фоновой почвой содержит в 1,5 раза больше СМ фазы, иллита, смешанослойных иллит-сметитов и в 1,5 раза меньше кварца, полевых шпатов, хлоритов. Увеличение доли илистых частиц в БС предположительно связано с интенсивным разрушением минерального субстрата *in situ* осолоделого горизонта не с поверхности, а на границе перехода осолоделого горизонта к текстурно-метаморфическому и внутри профильной партлювации частиц в текстурный горизонт.

Исследования выполнены в рамках плана НИР по теме FGUR 2025-005-05.3.

Градусов Б.П. Минералы со смешанослойной структурой в почвах. М.: Наука, 1976. 128 с.

Кринари Г.А., Храмченков М.Г., Рахматулина Ю.Ш. Изменение структур смешанослойных фаз иллит-сметит в процессах обводнения терригенных коллекторов нефти. Геология и геофизика. 2014. 55(7), 1153-1167.

Макшаев Р.Р., Ткач Н.Т. Хронология хвалынского этапа развития Каспия по данным радиоуглеродного датирования. Геоморфология и палеонтология. 2023. 54(1), 37-54.

Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. Тула, 2005. 336 с.

Глауконит месторождения Докан (Ирак): структурно-химические характеристики и условия формирования

Э. Даси¹, И. С. Хитрин¹, М.А.Рудмин¹

Глауконит как минерал-индикатор преимущественно морского диагенеза играет важную роль при палеогеографических и стратиграфических исследованиях. В данной работе приводится пример использования глауконитовых пород для решения стратиграфических задач в мезозойских толщах Ирака.

Месторождение глауконита Докан находится в 65 км к северо-западу от города Сулеймания в Иракском Курдистане (рис. 1). Разрез месторождения, находящегося в северо-восточной части Аравийской плиты, включает в себя каметанскую формацию верхнетуронского-нижекампанского возраста и ширанскую формацию верхнекампанского-маастрихтского возраста, которые разделены перерывом в осадконакоплении (Jaff и др., 2015; Al-Shareefi и др., 2019). Обе формации представлены глауконитовым песчаником с высоким количеством органических остатков морской фауны. При этом пласты формации Ширан являются основным маркерным руслом для разрушенной, а затем затопленной морем поверхности формации Каметан (Al-Banna, 2010). Изучение глауконитовых песчаников кампанского возраста было поставлено для уточнения условий осадконакопления и стратиграфической привязки исследуемого района.

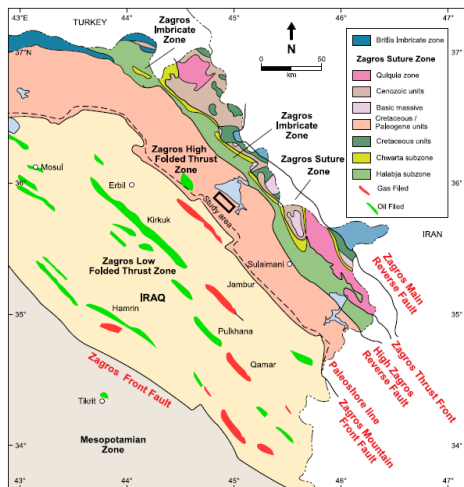


Рис. 1. Региональная структурная геология и границы, включая область исследования (Stevanovic and Markovic 2003, Lawa et la 2023)

¹ НИ ТПУ, Томск, de01@tpu.ru

Целью данной работы является изучение структуры и состава глауконитовых песчаников ширанской и каметанской формаций на месторождении Докан и глауконита в отдельности. Основные структурно-химические характеристики глауконита определялись при помощи следующих методов: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ).

На основе СЭМ снимков можно сделать вывод о том, что глауконит имеет глобулярно-чешуйчатую морфологию (рис. 2). Минерал представлен зернами округлой, овалообразной формы (А, В). Средний размер микрочастиц составляет 1-2 мкм. Микрочастицы представлены чешуйчатыми и пластинчатыми ультрамикро-агрегатами (С). При анализе состава пород было установлено, что образцы глауконитового песчаника, отобранные в подошве ширанской формации, расположенной над несогласием, были сформированы в шельфовых условиях осадконакопления. Состав пород и органические остатки вышележащих пластов той же формации указывают на углубление бассейна седиментации, что свидетельствует о трансгрессии моря во время осадконакопления. При этом залегающие под несогласием глауконитовые песчаники каметанской формации содержат кремнистые конкреции, также характерные для более глубоких условий осадконакопления.

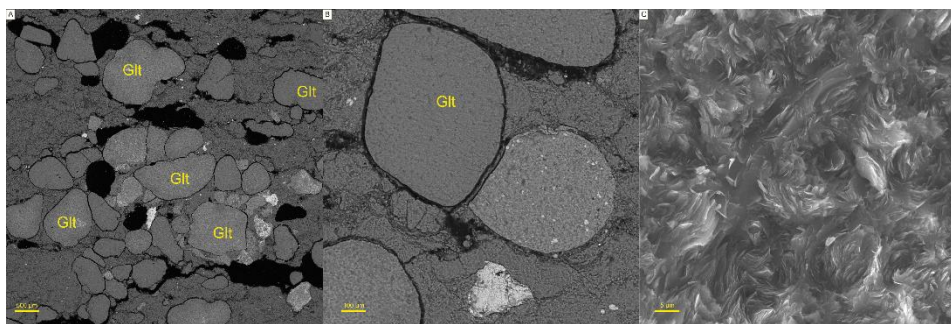


Рис. 2. Снимки СЭМ в детекторе вторичных электронов зерен глауконита в глауконитовом песчанике (А, В, С)

Исследование глауконитовых песчаников Доканского месторождения позволило уточнить структурно-химические характеристики глауконита, а также реконструкцию палеогеографических условий поздне мелового осадконакопления. Глауконит выступает важным индикатором процесса трансгрессии моря и глубины бассейна седиментации. Эти данные имеют значение для дальнейшей стратиграфической корреляции пород региона.

Работа выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10002-П.

Lawa, F.A., Mohammed, I., Farouk, S., Ahmad, F., Faris, M., Tanner, L., Al-Kahtany, K., 2023. Stratigraphic architecture of the Tethyan Cenomanian-Turonian succession and OAE2 in the Dokan Area, Kurdistan Region, northeast Iraq. *J. African Earth Sci.* 207, 105064. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105064>

Jaff, R.B.N., Williams, M., Wilkinson, I.P., Lawa, F., Lee, S., Zalasiewicz, J., 2014. A refined foraminiferal biostratigraphy for the Late Campanian–Early Maastrichtian succession of northeast Iraq. *GeoArabia* 19, 161–180. <https://doi.org/10.2113/geoarabia1901161>

Al-Shareefi, I., Al-Badrani, O., Yousif, A., 2019. Micropaleontological Study of the Contact Between Kometan and Shiranish Formations from Dokan Area, Northern Iraq, *Advances in Science, Technology & Innovation/Advances in science, technology & innovation*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01452-0_{ }28

Al-Banna, N.Y., 2010. Sequence stratigraphy of the Late Campanian – Early Maastrichtian Shiranish Formation, Jabal Sinjar, northwestern Iraq. *GeoArabia* 15, 31–44. <https://doi.org/10.2113/geoarabia150131>

Использование данных по стабильным изотопам бора ($\delta^{11}\text{B}$) для оценки взаимодействия в системе подземная вода-глины на примере юго-восточного Забайкалья

В.В. Дребот¹, С.В. Борзенко², О. Шуакар-Сташ^{3,4}, Р. Стотлер⁵

Изотопы бора – один из новейших геохимических инструментов, используемых в гидрогеологических исследованиях. Бор (В) имеет два стабильных изотопа (^{10}B и ^{11}B), соотношения которых в растворах контролируются значением pH, температурой и формой миграции, основной из которых является борная кислота H_3BO_3 , а с ростом щелочности раствора увеличивается доля борат-ионов $\text{B}(\text{OH})_4^-$. Бор может вступать в реакцию с глинистыми минералами, в результате чего легкий изотоп В (^{10}B) преимущественно сорбируется в глинах, приводя к более высоким значениям $\delta^{11}\text{B}$ в конечном растворе (Vengosh и др., 1994), что может раскрыть принципиально новые аспекты понимания процесса вторичного минералообразования при взаимодействии в системе вода-порода.

Изотопные отношения бора ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$) измеряли относительно NIST SRM-951 в 14 пробах воды методом масс-спектрометрии с термической ионизацией на приборе Triton Thermo Scientific (США) в лаборатории IT2. Результаты представлены в виде $\delta^{11}\text{B}$, где:

$$\delta^{11}\text{B} (\text{‰}) = \left[\frac{(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{проба}}}{(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{стандарт NBS951}}} - 1 \right] \times 1000$$

Содержания определяли методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) в ПНИЛ ГХ ТПУ (г. Томск). Индексы насыщения вод (SI) относительно минералов вмещающих пород и формы миграции рассчитывали в программе GWB с использованием баз данных thermo.tdat и phrqritz.tdat. Изучение пород проводилось с помощью РЭМ на базе аналитического комплекса сканирующего электронного микроскопа «VEGA II LMU» совмещенного с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром модели INCA Energy 350 в Аналитическом центре геохимии природных систем ТГУ (г. Томск).

Район исследования находится на юго-востоке Забайкальского края (рис. 1а). Пробы воды отбирали вокруг самых крупных водных объектов региона – трансграничных Торейских озёр. Основная особенность региона – это изменчивый гидрологический режим, в результате которого широко

¹ТФ ИНГГ СО РАН, Томск, DrebotVV@ipgg.sbras.ru

²ИПРЭК СО РАН, Чума, svb_64@mail.ru

³Isotope Tracer Technologies Inc., Уомеплу, orfan@it2isotopes.com

⁴Гуэлфский университет, Гуэлф

⁵Университет Уомеплу, Уомеплу, randy.stotler@uwaterloo.ca

распространённые здесь солёные озёра практически полностью пересыхают раз в 25–30 лет, после чего наступает фаза увлажнения, и они снова наполняются водой. Последний маловодный период начался еще в 1999 г., а первые признаки обводнения появились только в 2021 г, т.е. в регионе фиксируется затянувшаяся почти на 10 лет аридизация. Уровень грунтовых вод в засушливый период также снижается, поэтому их участие в питании озёр уменьшается. По мере понижения абсолютных отметок рельефа от области питания в сторону сброса, химический тип исследуемых вод постепенно сменяется от Ca-HCO_3 к Na-HCO_3 , демонстрируя признаки содового засоления. Общая минерализация и pH воды увеличиваются от 0,2 до 3,2 г/л и 6,7 до 8,9 соответственно в том же направлении, а также растёт количество равновесных минералов (рис. 2б), в том числе глинистых, которые были обнаружены в качестве вторичных при изучении пород региона (рис. 2в).

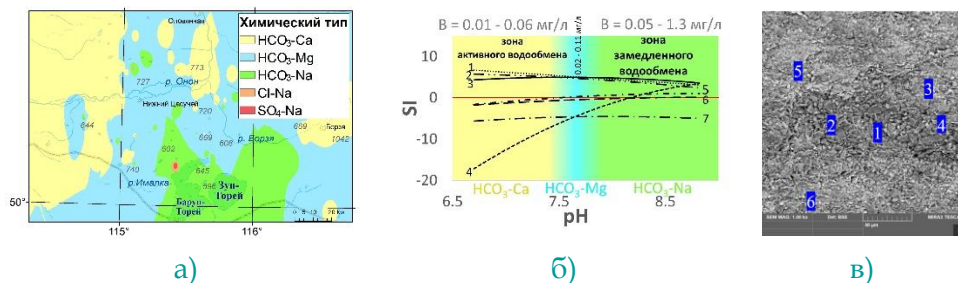


Рис. 1 (А) Распределение химических типов подземных вод (цифры на карте показывают высоту); (Б) индексы насыщения (SI) вод в зависимости от pH воды и содержания В: 1 – монтмориллонит, 2 – каолинит, 3 – иллит, 4 – хлорит, 5 – кальцит, 6 – альбит, 7 – анортит; РЭМ снимок глинистого сланца: 1,2-каолинит, 3,4-иллит, 5,6-иллит+кальцит (В)

Содержание В в исследуемых подземных водах варьирует от 0,01 мг/л до 1,3 мг/л, при этом чётко прослеживается его симбатное увеличение с минерализацией и pH (рис. 1б), достигая наибольших значений в точках с максимальной солёностью и щелочностью. Такая картина является типичной для грунтовых вод отдельных бессточных районов аридной зоны и является следствием содового засоления (Крайнов и др.; Vengosh, 2013). Согласно расчётам, основная форма миграции бора в исследуемых водах – H_3BO_3 , при этом с ростом pH до 7,5 и более увеличивается доля B(OH)_4^- (рис. 2б). Значения $\delta^{11}\text{B}$ находятся в пределах от -11,87‰ до 8,13‰, также демонстрируя рост по мере увеличения щелочности раствора (рис. 2а). При этом наиболее низкие показатели $\delta^{11}\text{B}$ характерны для вод Ca-HCO_3 и Mg-HCO_3 типов, а высокие для Na-HCO_3 .

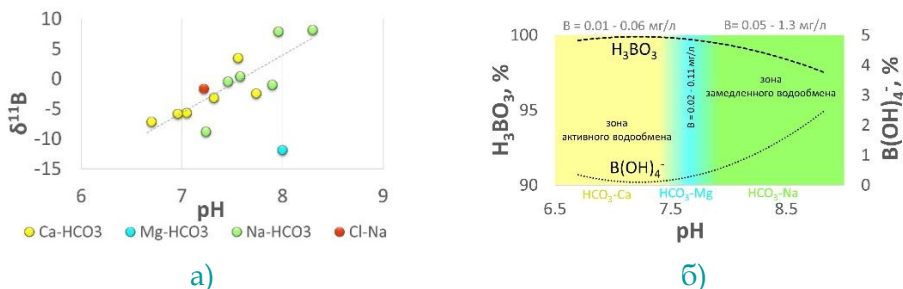


Рис. 2 Зависимость $\delta^{11}B$ от pH исследуемых вод (А), соотношение форм миграции В в зависимости от pH воды и содержания элемента (Б)

Таким образом, можно предположить, что аккумуляция бора в исследуемых подземных водах контролируется взаимодействием в системе «вода-глины», что отражается в распределении изотопных сигнатур В. По мере движения потока от области питания в сторону понижения абсолютных отметок рельефа к области разгрузки водообмен замедляется, количество и разнообразие равновесных с водой минералов (Дребот, 2023; Borzenko и др., 2020), в том числе и глин (рис. 1б и в), увеличивается, солёность и щелочность растут в том же направлении, а химический тип воды меняется с Ca-HCO₃ и Mg-HCO₃ на Na-HCO₃. Это ведёт к более интенсивной миграции бора в форме B(OH)₄⁻, которая удерживает элемент в растворе и обеспечивает его концентрирование в исследуемых подземных водах до значений выше ПДК. Поскольку величина адсорбции в форме борат-иона глинистыми минералами выше, чем у борной кислоты, это приводит к изотопному фракционированию. Легкий изотоп ¹⁰B избирательно переходит в глины, приводя к более высоким значениям $\delta^{11}B$ в конечном растворе, поэтому изотопные соотношения бора можно использовать как в качестве трассера взаимодействия в системе «вода-глина», так и при изучении процессов засоления в целом.

Работа выполнена при поддержке проектов ФНИ РАН (№0266-2022-0016 и №121032200070-2). Авторы благодарят лабораторию ИТ2 за возможность измерить ¹¹B/¹⁰B.

Дребот В.В. Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. (Т.: ТПУ), 2023.

Крайнов С.Р., Рыженко Б. Н., Швецов В. М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты (Москва: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012).

Vengosh A., Heumann K.G., Juraske S., Kashner R. Boron Isotope Application for Tracing Sources of Contamination in Groundwater. Environmental & Soil Sciences. 1994. V. 28. P. 1968–1974.

Vengosh A. Salinization and Saline Environments. Treatise on Geochemistry: Second Edition. (Amsterdam: Elsevier, 2013). P. 325–378.

Borzenko S.V., Dreboto V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: A case study from south-eastern Transbaikalian region (Russia). Applied Geochemistry. 2020. V. 123.

Состав глинистой фракции кремнисто-глинистых пород баженовского горизонта (Западная Сибирь)

С.С. Дягилев¹, М.В. Шалдыбин¹

АО «ТомскНИПИнефть» более 10 лет занимается целенаправленным изучением отложений баженовского горизонта как потенциального объекта нефтеносных сланцев. Исследуется обычно полный разрез скважин, вскрывающих баженовский горизонт, а также прилегающие к ней формации. Нами был исследован валовый минералогический состав и отдельно глинистые минералы (каолинит, хлорит и иллит) в интервале залегания 2850-2900 метров. Минералогический состав пород и содержание глинистых минералов был определен XRD-методом на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV.

В целом баженовский горизонт относится к типичным кремнистым сиаллитовым породам – глинисто-кремнистым сланцам. Об этом свидетельствует преобладание в ее составе кремнезема (SiO_2), содержание которого может достигать 95%, а также находки радиоляриевой фауны. Однако при ее развитии кверху и к низу горизонт постепенно глинизируется. Содержание глинистой фракции увеличивается и может достигать 45% кверху и 20% к низу.

Основными порообразующими минералами для баженовского горизонта являются кремнезем (кварц), полевые шпаты, карбонатные минералы (кальцит, доломит, сидерит как в виде отдельных прослоев/линз, так и в рассеянном виде в матрице породы), сульфиды (пирит, марказит), глинистое вещество, а также органическое вещество. Соотношение этих минералов позволяет разбивать баженовскую свиту на вещественные пачки №№ 1-6 вверх по разрезу (Гаврилов и др., 2015):

1. Темно-буровато-серые силициты малоглинистые с низким $C_{\text{орг}}$ в переслаивании с радиоляритами кремнистыми (чаще), и неоднородно карбонатизированными (реже). Отмечаются фосфатизированные линзы коричневого цвета. Каротажные кривые отображают плавный переход от подстилающих образований к типично баженовским.

2. Силициты слабоглинистые углеродистые ($C_{\text{орг}}$ – 5-10%). Существенно кремнистые однородные по составу участки разреза с содержанием $C_{\text{орг}}$, обычно растущим снизу-вверх, что отражается в росте значений ГК. Характерно присутствие двустворок, остатки радиолярий, *Onychites* spp. и рыб.

¹АО «ТомскНИПИнефть», Томск, shaldybinMV@tomsknpi.ru

3.«Радиоляритовая». Представлена высококремнистыми силицитами и радиоляритами, чаще всего вторично кальцитизированными, либо доломитизированными, с тонкими прослоями более глинистых силицитов. Остатки макрофауны редки и не характерны, за исключением аллохтонных скоплений остатков нектона (рыб и теутид). Состав пачки отвечает высокой биопродуктивности радиолярий.

4.«Высокоуглеродистая», контрастно выделяется аномально высокими содержаниями ОВ (керогена), высокой радиоактивностью, повышенной глинистостью, однородностью и выдержанностью по латерали. Кровля проходит по уплотненному интервалу, появлению слоев, насыщенных бухиями и кокколитофоридами.

5.«Кокколитофоридовая». Силициты карбонатно-глинистые высокоуглеродистые. Выделяется в керне как единый монотонный интервал. Подошва пачки отбивается по появлению слоев, насыщенных бухиями, в больших количествах появляется фрамбоидальный пирит.

6.«Пиритовая». Сложена углеродистыми глинами кремнистыми вплоть до глинистых силицитов. Породы тонко горизонтально-слоистые, интенсивно пиритизированы, бескарбонатные (редко - малокарбонатные) с постоянным присутствием остатков рыб. Имеет пониженные значения ГК по отношению к ниже- и вышележащим отложениям. $C_{орг}$ в пределах от 4 до 8%.

Типовой состав, а также содержание минералов для глинистой фракции представлены на рисунке 1.

Особенности содержания глинистых минералов следующие:

Мусковит/иллит, а также смешанно-слоистые минералы ряда смектит-иллит являются основным глинистым минералом, встречающимся по всей глубине разреза баженовского горизонта. Мусковит/иллит в целом являются подчиненными минералами на фоне аутигенного кремнезема.

Хлорит имеет подчиненное содержание по отношению к иллиту/мусковиту. Его появление отмечается по мере уменьшения количества кремнезема и перехода к пачке 6. Как хлорит, так и мусковит/иллит связаны с терригенным привнесом осадков и находят положительную корреляционную связь с содержанием полевых шпатов.

Каолинит практически не встречается в отложениях баженовского горизонта, но может аномально содержаться в тонких вулканогенных пропластках (Кондрашова, 2021), очень редко обнаруживается локально на снимках РЭМ, имеет вероятно аутигенное происхождение, ранее отмеченное рядом исследователей (Эдер и др, 2025).

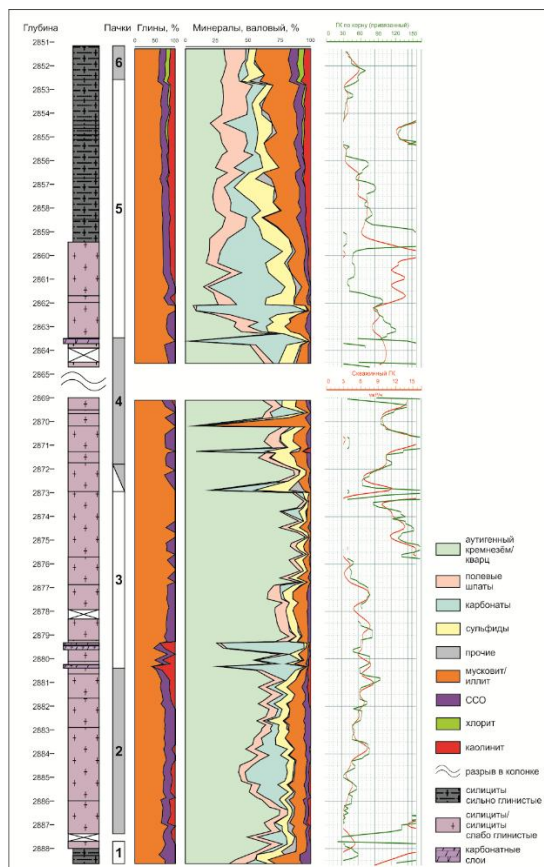


Рис. 1 Литологический разрез по скважине, вскрывшей баженовский разрез: валовая минералогия, состав глинистой фракции, ГК по керну/скважинный (Широтное Приобье, Западная Сибирь)

Кондрашова Е.С. Вулканогенные прослои в баженовской свите Западно-Сибирского осадочного бассейна. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. 332(3), 62-73.

Эдер В.Г., Скоморохова А.Д., Замирайлова А.Г. Аутигенный каолинит верхнеюрско-нижнемеловой баженовской свиты Западной Сибири. Литология и полезные ископаемые. 2025. 2, 176-197.

Гаврилов Е.А., Жуковская Е.А., Тугарова М.А., Остапчук М.А. Целевая классификация пород баженовской свиты (на примере месторождений центральной части Западной Сибири). Геология и геологоразведочные работы. 2015. 12, 38-40.

Особенности аутигенного хлорита песчаников нижнемеловой ачимовской толщи северных районов Западной Сибири

Е.А. Жуковская¹

В результате стадийного анализа (204 образцов) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с применением рентгеноспектрального микрозонда (492 замера) в нижнемеловых алевропесчаных породах-коллекторах ачимовских пластов ряда месторождений северной части Западной Сибири было установлено, что среди аутигенных минералов в ачимовских отложениях, достигших стадийных литогенетических преобразований на уровне среднего катагенеза наибольшее распространение имеет хлорит (встречаемость 100%, среднее содержание 7,4 %), для которого впервые выделены и количественно оценены несколько генераций (табл.1). В целом доля пелитовой фракции составляет в среднем 8,5 %, что существенно выше указанной в работе (Шалдыбин, Захарова, 2023) для пластов ачимовской группы: содержание глинистой компоненты изменяется в пределах от 2 до 8 % (среднее - 3,7 %).

Таблица 1 – Химический состав аутигенного хлорита на основе данных СЭМ ЭДС

Генерация хлорита	Стадия литогенеза	Содержание, %	Состав хлорита по СЭМ, средний (диапазон)		
			Магний, %	Железо, %	Mg/Fe
обломочный	седиментогенез	< 1	8,2 (6,49-11,06)	19,9 (14,36-26,82)	0,45 (0,26-0,67)
плечный	диагенез ранний	0.4-3.1	5,7 (2,69-7,85)	19,7 (13,66-27,86)	0,31 (0,15-0,46)
по биотиту	диагенез поздний (?)	0-0,5	5,4 (2,84-7,61)	16,9 (9,54-23,63)	0,35 (0,12-0,66)
поровый	катагенез ранний	0.3-7,2	6,0 (2,67-15,72)	17,9 (9,25-26,83)	0,31 (0,22-0,41)
замещения*	наложенный эпигенез	0-0,3	5,9 (5,62-6,14)	22,0 (16,68-27,38)	0,26 (0,25-0,26)

Примечание: * - развит по другим обломочным зернам, исключая биотит

Рассматриваемые алевропесчаные породы ачимовской толщи имеют полимиктовый состав, низкую минеральную и среднюю до высокой структурной зрелости. В целом же для пород с уменьшением зернистости

¹ НТЦ НИС, Сербия, Нови Сад, zhukovskaia.ea@nis.rs

пород наблюдается рост глинистого цемента и пелитовой фракции по данным гранулометрического анализа, т.е. сохраняется первичный седиментационный контроль развития глинистых аутигенных минералов.

В ходе исследования установлено, что влияние минеральной зрелости пород на тип и объем цементации пород отсутствует. Доминирование хлорита среди глинистых минералов обломочных пород может также свидетельствовать о быстрой седиментации и захоронении осадка.

Аутигенные хлориты выделенных генераций принципиально отличаются как морфологически, так и по составу. Хлорит самой ранней генерации – пленочный (рис. 1), вероятно появляется за счет Fe-монтмориллонита/сметкита, связанного с разложением базальтовой гиалокластики, привнесенной с востока (траппы Восточной Сибири).

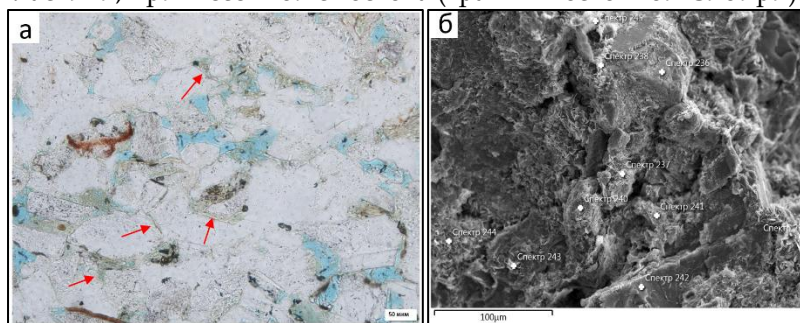


Рис. 1. Пленочный хлорит: а – фото шлифа (николи I), б- снимок СЭМ

По мнению исследователей, изучавших песчаные пласты Кустового месторождения (Северо-Вартовская мегатерраса), крустификационные оторочки и пленки хлорита обусловлены перекристаллизацией седиментогенного хлорита (Шмырина, Морозов, 2013), а по мнению Зинчука (Зинчук, 1976), М.В. Шалдыбина и С.А. Захаровой (Шалдыбин, Захарова, 2023) указывают на приуроченность таких отложений к морским бассейнам. Это согласуется и с выводами автора о относительно глубоководном турбидитовом генезисе пород ачимовской толщи (Жуковская, Ольнева, 2018). Пленочный хлорит в виде тонких крустификационных каемок облекающий обломочные зерна препятствует как растворению зерен, так и их регенерации (рис. 1).

Развивающийся по биотиту хлорит не подвергнулся последующей гидратации, замещению монтмориллонитом, что на ряду с практически полным отсутствием каолинита свидетельствует о слабом изменении гипергенными процессами Fe-Mg-разностей (основных) изверженных и метаморфических пород в областях питания обломочным материалом и отсутствии многократного рециклинга осадка. Вероятно, такой хлорит

сформировался в восстановительной или слабо восстановительной обстановке за счет силикатной части биотита.

Связь объемов хлоритизации биотита от общего количества обломочного биотита (выполнена для 2 скважин) в породе отсутствует. Оценка количества хлорита, развитого по биотиту, в шлифах затруднена. Доля хлорита в биотитовых зернах колеблется от 20 % до полного замещения биотита (в среднем 37,9 %). Этот аутигенный хлорит не является цементом, но по данным рентгенофазового анализа не разделяется, увеличивая тем самым суммарную долю хлорита в породе.

Поровый хлорит отнесен к раннекатагенетическим минералам по характеру взаимоотношений с другими аутигенными минералами, имеет максимальное содержание среди всех генераций (табл. 1), его состав наиболее близок к пленочному хлориту. Важно отметить, что рентгеноспектральным микронзондовым химическим анализом при выполнении СЭМ для разных генераций хлорита было установлено, что более поздние генерации относительно обогащены железом (табл. 1), что принципиально отличает аутигенный хлорит песчаников от хлорита глинистых пород, где в ходе катагенеза растет магнезиальность хлоритов (Жуковская, 2002). Повышенное содержание железа в поздних генерациях возможно связано с накоплением его в пластовых водах при унаследованной гидратации биотита и его сидеритизации, а также привносе гидротермальными или элизионными растворами.

Дополнение статистической выборки может несколько уточнить/изменить количественные показатели аутигенных хлоритов (содержание, состав), что может быть обусловлено различными типами литогенеза в Западно-Сибирском осадочном бассейне.

Жуковская Е.А. Геохимия процессов вторичного минералообразования в юрских нефтегазоносных отложениях Нюрольского осадочного бассейна: Томская область: дис. ...канд. Геол.-мин. Наук 25.00.09 / Томск. – 2002. – 195 с.

Жуковская Е.А., Ольнева Т.В. Особенности формирования нижнемеловых турбидитов Западной Сибири // Материалы IX Всероссийского совещания 17-21 сентября 2018 г./ НИУ «БелГУ». - Белгород. - 2018. - С. 133-137.

Зинчук Н.Н. О специфике глинистых минералов в осадочных формациях // Вестник Пермского университета. - 2022. - №1(Т.21). – С. 10-23.

Шалдыбин М.В., Захарова С.А. Состав глинистой фракции и ее влияние на емкостные свойства песчаных пород-коллекторов (нефтяное месторождение, Западная Сибирь // Материалы X Международного совещания по литологии (г. Воронеж, ВГУ, 18–23 сентября 2023 г.) / Воронеж. - 2023. - С. 491-494.

Шмырина В.А., Морозов В.П. Влияние вторичных изменений пород-коллекторов на фильтрационно-емкостные свойства продуктивных пластов БС₁₁¹ И ЮС₁¹ Кустового месторождения. // Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. Т.155, кн.1. - 2013. - С. 95-100.

Влияние условий синтеза на формирование минералов группы каолинита

**Т.А. Королева¹, Б.В. Покидько¹, И.А. Морозов¹,
А.А. Нестеренко¹, В.В. Крупская^{1,2}**

Интерес к синтезу алюмосиликатов – синтетических аналогов природных минералов – связан с исследованиями, направленными на более глубокое понимание процессов и условий минералообразования. Одним из факторов, определяющих структуру и свойства конечных материалов при синтезе, является тип прекурсоров, используемых в качестве исходных компонентов для синтеза, а также условия, при которых достигается максимальная гомогенизация компонентов. Работы по синтезу алюмосиликатов проводились в 70-х гг. российскими учеными - Франк-Каменецким В.А., Котовым Н.В., Гойло Э.А. и др., а через много лет были инициированы в Институте химии силикатов имени И.В. Гребенщикова в г. Санкт-Петербург. Представленное исследование вдохновлено работами коллег Голубева О.Ю., Аликина Ю.А. и др. (Golubeva et al., 2020).

Для синтеза было использованы три прекурсора кремнезема – тетраэтоксисилан (ТЭОС), силиказоль Наносил и раствор силиката метиламина (Аминосиликат). Синтез проводился при различных температурах (200, 250, 300 °С), продолжительности (от 3 до 10 дней) и pH (от 3,4 до 10,8), а также при вариациях содержания железа (от 1 до 10 %), и соотношения алюминий-кремний.

В результате гидротермального синтеза с использованием различных прекурсоров кремнезема были получены синтетические аналоги каолинита различной степени кристалличности - наибольшей обладают образцы из Наносила, наименьшей – образцы из ТЭОС (Koroleva et al., 2025). Кроме того, использование различных прекурсоров повлияло на морфологию и температуру дегидроксидации каолинита, последняя снижается для образца ТЭОС (рис. 1).

При увеличении содержания железа в шихте для синтеза наблюдается небольшое снижение степени кристалличности образцов (AGFI 1.44 - 0% Fe, AGFI 1.34 - 10% Fe), а также наблюдаются изоморфные замещения железа в структуре по присутствию полос 3600 и 875 см⁻¹ на инфракрасных спектрах (Madejova, Komadel, 2001).

¹ИГЕМ РАН, Москва, tanakoro@yandex.ru

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, krupskaya@ruclay.com

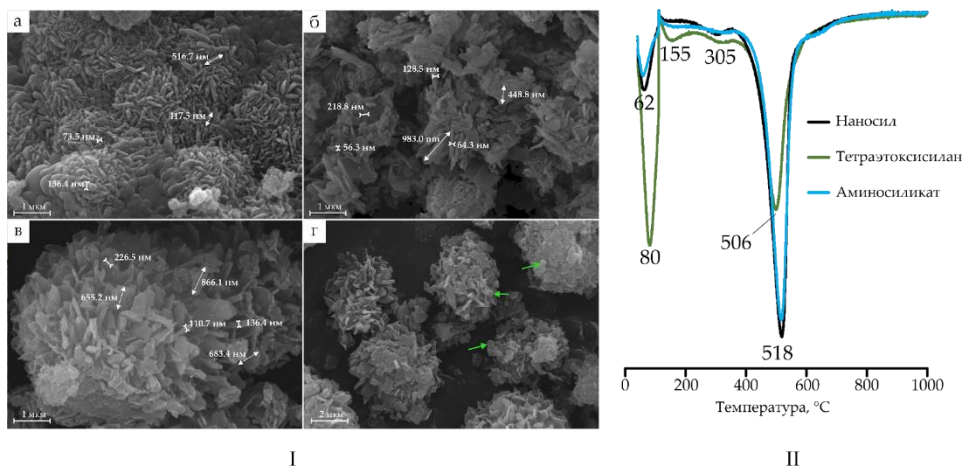


Рис. 1 СЭМ-снимки (I) синтезированных образцов с использованием различных прекурсоров кремнезема: а – ТЭОС, б – Наносил, в, г – Аминосиликат. Кривые дифференциального термического анализа (II)

Увеличение продолжительности синтеза и температуры повлияло на увеличение степени кристалличности синтезированных аналогов минералов группы каолинита и размера их кристаллитов. Наиболее существенные изменения в синтетических образцах наблюдались при различных значениях pH. При низких значениях pH (3,4) образуется хорошо упорядоченный каолинит, тогда как высоких pH (10,8) – образовался разупорядоченный каолинит с примесью 10,3 Å фазы.

Работы выполнены в рамках Госбюджетной темы ИГЕМ РАН.

Франк-Каменецкий В.А. Гидротермальный синтез в системах галлуазит и каолинит + хлориды К, Na, Са, Mg под давлением. Проблемы петрологии и генетической минералогии. Т. 1. М.: Наука, 1969. С. 143-162.

Франк-Каменецкий В.А., Котов Н.В., Гойло Э.А. Гидротермальный синтез смешаннослойных образований в системах каолинит – хлориды К, Na, Са, Mg под давлением. Глины, их минералогия, свойства и практическое значение: Материалы совещ. М.: Наука, 1970. С. 39-51.

Golubeva, O. Y., Alikina, Y. A., & Kalashnikova, T. A. Influence of hydrothermal synthesis conditions on the morphology and sorption properties of porous aluminosilicates with kaolinite and halloysite structures. Applied Clay Science, 2020, 199, 105879. doi:10.1016/j.clay.2020.105879.

Koroleva, T.; Pokidko, B.; Morozov, I.; Nesterenko, A.; Kortunkova, S.; Chernov, M.; Ksenofontov, D.; Krupskaya, V. Hydrothermal Synthesis of Kaolinite Group Minerals. Materials 2025, 18, 472. <https://doi.org/10.3390/ma18030472>

Madejová, J.; Komadel, P. Baseline studies of the clay minerals society source clays: Infrared methods. Clays Clay Miner. 2001, 49, 410–432.

Особенности кристаллического строения и процессов образования гидротермального каолинита рудопроявления Утёсное (Приморский край)

Д.М. Коршунов¹, Г.Н. Овсянников²

Каолинит – повсеместно распространённый глинистый минерал с двухслойной структурой типа 1:1, который встречается в разнообразных геологических формациях. Он формируется в широком диапазоне температур и pH условий. С учётом его простого химического состава и высокой устойчивости к поздним процессам преобразования в геологических исследованиях используется как важный маркер протекающих процессов.

Повышенный интерес исследователей вызывают вопросы минералообразования гидротермального каолинита, особенно механизмы его формирования, при которых образуются глины, обогащённые каолинитом более чем на 70%. В качестве примеров таких природных систем можно привести известные на весь мир месторождения весьма «чистого» каолина: Корнуолл (Англия), Калипуй (Перу), Гуанухуато (Мексика) (Bristow, 1993; Dill, 2016).

Интерес к исследованию гидротермального каолинита обусловлен несколькими основными факторами. Во-первых, за счёт своих специфических физико-химических условий образования каолинит позволяет моделировать эволюцию гидротермальной системы и определять достаточно точно температуры и источники флюидов (Dill et al., 1997); во-вторых, с каолинитом связывают зоны концентрации золота и серебра и поэтому он часто является поисковым критерием при геологоразведочных работах; в-третьих, до сих пор остаётся спорным сам механизм гидротермального образования каолинита; и в-четвёртых, создание технологии промышленного синтеза каолинита не может быть адекватно построено без понимания природных механизмов.

Рудопроявление Утёсное – это малоизученное золотокварцевое проявление рядом с селом Утёсным (Уссурийский район), по всей видимости, относящееся к эпитермальному типу. Каолинит здесь формировался в виде сплошных зон каолинизации, а процесс протекал с высокой степенью интенсивности вплоть до образования мономинеральных выделений, размером 30 на 30 см и более. Именно такой мономинеральный каолинитовый «метасоматит» стал объектом изучения. Основная цель исследования – комплексный анализ для установления процессов специфического минералообразования. Образец каолинового «метасоматита» представляет собой молочно-белое полупрозрачное образование раковистого излома с

¹ ГИН РАН, Москва, dmit0korsh@gmail.com

² МГУ им М.В.Ломоносова, Москва, george_ovs@mail.ru

редкими тёмно-серыми прожилками. Минеральный состав и кристаллические особенности изучались методами рентгеновской дифракции (Bruker D8 Advance) как в порошковых, так и в ориентированных препаратах, а также методом ИК-Фурье спектроскопии (Bruker Vertex 80v), химический состав определялся методами рентгено-флуоресцентного анализа (Bruker Tiger S8) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (Thermo Fisher Element 2). Минеральные примеси и текстурные особенности кристаллитов каолинита определялись методом сканирующей электронной микроскопии с EDS приставкой (JEOL JSM-IT500).

Согласно данным рентгеновской дифракции, изученный образец состоит на 100% из каолинита, а его дифрактограмма близка к теоретической. Индекс Хинкли составляет 0.68, а содержание в нём высокоупорядоченной фазы (НОК), рассчитанная по методу Б.А Сахарова и В.А. Дрица (Sakharov et al., 2016) – 22%. На ИК спектрах, изученный образец имеет характерные для каолинита две сильные полосы поглощения ($\sim 3697\text{ см}^{-1}$, $\sim 3620\text{ см}^{-1}$) и две слабые ($\sim 3670\text{ см}^{-1}$, $\sim 3652\text{ см}^{-1}$), которые хорошо описываются при разложении их по Лоуренсу. Минеральные примеси методами XRD и FTIR не обнаружены.

Валовый химический состав изученного образца: 44.3% SiO_2 и 39.78% Al_2O_3 ($\text{Si}/\text{Al}=0.8$). Остальные петрогенные оксиды имеют суммарное содержание 0.6%. При том, что потери при прокаливании составляют 15.34% массы, химический состав весьма близок к теоретическому составу каолинита. Для изученного образца характерно высокое содержания Li (435.3 ppm) и Sr (448.1 ppm), относительно невысокое содержание РЗЭ (Σ 134.5 ppm). При этом, гидротермальный каолинит значительно обогащён лёгкими РЗЭ ($\text{LREE}/\text{HREE} = 137.8$) и обладает ярко выраженными положительными европиевой и цериевой аномалиями.

При СЭМ изучении образца выяснено, что отдельные кристаллиты каолинита всегда формируют псевдогексональные формы с хорошо выраженными гранями, размерами от 0.7 до 3 мкм. Кристаллиты ориентированы и образуют крупные плотные агрегаты, напоминающие своим обликом листы, размер которых 150-400 мкм. При этом полностью отсутствуют так называемые вермикулы каолинита, характерные для каолинита кор выветривания. В единичных количествах обнаружены идиоморфные кристаллы циркона, рутила и галенита, размером до 10-15 мкм. В относительно небольшом количестве встречаются тонкие прожилки флоренсита, формирующие интерстиционные выделения между кристаллитами каолинита. Флоренсит – Ce-La-содержащий APS-минерал ($(\text{Ce}, \text{La})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$). APS минералы – это типичная ассоциация для первичного каолинита, и в зависимости от генезиса каолинита формируются разные минералы этой группы (Dill, 2001). По всей видимости, именно

наличие флоренсита объясняет такое значимое превышение лёгких РЗЭ над тяжёлыми.

Исходя из минеральной ассоциации, гидротермальный каолинит рудопроявления Утёсное формировался в узком диапазоне температур и при низких значениях рН среды т.к. при температуре <150 °С в ассоциации должен был бы проявиться галлуазит, а при температурах > 350 °С – диккит. При значениях рН >5 в минеральной ассоциации обязательно были бы смектиты по (Dill, 2016). Галенит, минерал кислых условий, также подтверждает низкие значения рН. Низкая степень упорядоченности каолинита и высокое содержание Sr типичны для гидротермального механизма образования, как и наличие хорошо сформированных гексагональных выделений при отсутствии вермикулярных агрегатов. Характерно, что за исключением La, Ce и Eu распределение РЗЭ аналогичное таковому в гранитах, что связывает гидротермальную систему с кислым магматизмом.

Процесс формирования мономинерального «каолинитового метасоматита», изученного на примере материала рудопроявления Утёсное, не демонстрирует каких-либо значимых отличий от представленных в опубликованной литературе гидротермальных каолинов. Хотя обычно гидротермальные каолины встречаются в ассоциации с большим количеством APS минералов, кварцем, рутилом, а также в смеси с другими глинистыми минералами. Несмотря на это, изученный образец является уникальной находкой, а специфические особенности позволяют использовать его в качестве стандарта низко упорядоченного гидротермального каолинита.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГИН РАН № FMMG-2023-0008.

Bristow C.M. The Genesis of the China Clays of South-West England - A Multistage Story // Kaolin Genesis and Utilization. 1993. V. 1. P. 171–203

Dill H. G. The geology of aluminium phosphates and sulphates of the alunite group minerals: a review // Earth-Science Reviews. 2001. №1–2 (53). P. 35–93.

Dill H. G., Bosse H.-R., Henning, K.-N. et al. Mineralogical and chemical variations in hypogene and supergene kaolin deposits in a mobile fold belt the Central Andes of northwestern Peru // Mineralium Deposita. 1997. V. 32. № 2. P. 149–163.

Dill H.G. Kaolin: Soil, rock and ore // Earth-Science Reviews. 2016. V. 161. P. 16–129/ doi:10.1016/j.earscirev.2016.07.003

Sakharov B.A., Drits V.A., McCarty D.K. et al. Modeling Powder X-Ray Diffraction Patterns of the Clay Minerals Society Kaolinite Standards: Kga-1, Kga-1b, and Kga-2 // Clays and Clay Minerals. 2016. V. 64. №3. P. 314–333.

Характеристика гидротермальных глин Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка)

О.В. Кравченко¹, С.Н. Рычагов¹, А.В. Сергеева¹

Исследована толща глин Южно-Камбального Центрального термального поля (ЮКЦ), входящего в состав одной из трех групп «паровых струй» Камбального вулканического хребта южной Камчатки (Нехорошев, 1959). Оно расположено в кольцевой морфоструктуре диаметром 1000–1200 м (рис. 1). Одной из основных особенностей термопроявлений южной группы Камбального хребта является разгрузка в верхних горизонтах геотермальной системы глубинного щелочного металлоносного флюида, что свидетельствует о наличии в структуре этой вулканической постройки сквозькоровых тектонических нарушений, проницаемых для конвективного теплового потока. (Феофилактов и др., 2025).

В результате детальных исследований керна из скважин колонкового бурения на ЮКЦ определено строение и состав толщи гидротермальных глин.

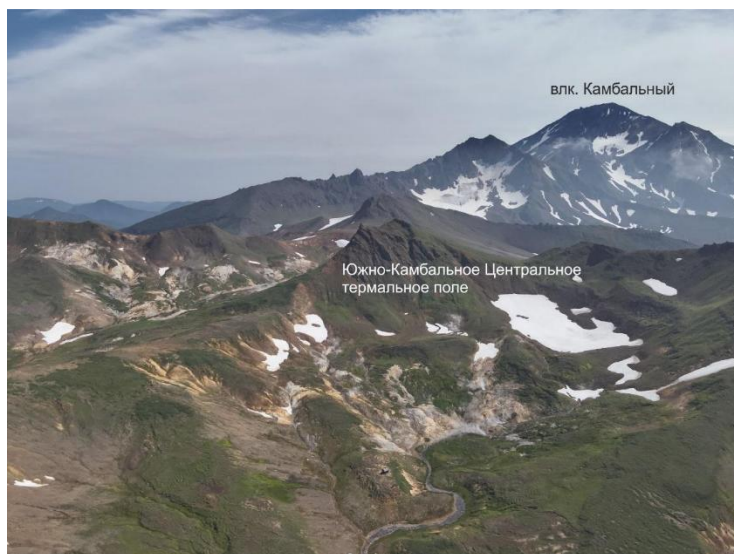


Рис.1. Южно-Камбальное Центральное термальное поле. Фото с квадракоптера Нуждаева И.А.

На площади ЮКЦ пробурено 9 скважин на глубину до 9-13 м, с послойным отбором проб каждые 15-20 см. Кернам детально описан,

¹ ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, kovina86@mail.ru

сфотографирован, замерена температура. Температура гидротермальных глин уже на 3 м от поверхности достигает 70 °С и увеличивается с глубиной.

Мощность горизонта, см	Литологическое строение	Фото карна (образцов)	Краткая характеристика
10-210			Глины сернокислотного выщелачивания: каолинит, сульфаты, пирит, марказит, др.
45-820			Горючие эластичных глин. Монтмориллонит, переход к смешаннослойным минералам и гидрослюдам, пирит и другие сульфиды, фосфаты Ca.
30-470			Глины темно-серого цвета. Сметкит, сульфаты, пирит, более однородные.
215-520			Глины серого цвета, сухие. Сметкит, карбонаты Ca и Mg, обилие пирита. С твердыми обломками исходных пород.
165-520			Андезитовые аргиллизированные, карбонатизированные и цеолитизированные с сульфидными Fe, Cu, Zn; самородными металлами (Ag, Cu), интерметаллическими соединениями.

Рис.2. Строение и состав гидротермальных глин Южно-Камбального
Центрального термального поля

В строении глин четко выделяется 5 горизонтов в активной части термального поля и 3 на окраине (рис. 2). Верхний горизонт зоны сернокислотного выщелачивания наблюдается на всей площади термального поля. Он представлен каолинит-алунитовыми глинами охристых оттенков с примесью минералов кремнезема, пирита, марказита, оксидов Fe и Ti, сульфатов Ca, Al, Fe и других металлов. Мощность его от 10 см до 200 см на термальных буграх. Ниже формируется мощный горизонт глин зоны углекислотного выщелачивания, который сложен преимущественно минералами группы смектита, а также содержатся хлориты, сульфиды, сульфаты и карбонаты Ca, Mg, Fe, Mn (Рычагов и др., 2021). В этой зоне на активной части термального поля можно выделить три горизонта, которые отличаются по цвету, физическим свойствам, химическим и минеральным составами. Верхний из них (на рис. 1 голубым цветом) играет большую роль в

структуре геотермальной системы. Он служит водоупором и тепловым экраном как для метеорных вод, так и для восходящих глубинных термальных растворов. Этот горизонт представлен глинами светло-серого цвета, сложен монтмориллонитом с примесью карбоната и рассеянным тонкодисперсным пиритом, от мягко-пластичной до полутвердой консистенции. Прослеживается на всей площади термального поля мощностью от 45 см на горячей части поля до 8,5 м на окраине. За счет такого бронирующего горизонта, ниже (бежевый цвет на рис. 1), в более проницаемом слое, происходит вскипание восходящих термальных растворов и образование новых минеральных ассоциаций, в том числе рудных (Рычагов и др., 2017). В одной из скважин в этом горизонте были обнаружены белоснежные включения до 2-3 см и прожилки до 10 см и мощностью до 2 см. По результатам ИК-спектрометрии и РФА эти включения были определены как ангидрит (CaSO_4) с повышенными концентрациями P_2O_5 , Cr, Ni, Zn, Rb, Y, Mo. Этот горизонт глин темно-серого цвета выделяется не во всех скважинах, имеет мощность от 30 до 470 см. Под ним выделяется горизонт (зеленый цвет) с более сухими глинами до пылеватых и твердых фрагментов/обломками исходных пород (андезибазальтов). Этот горизонт выделяется в скважинах только на горячей части термального поля. В основании разреза залегают аргиллизированные, пористые, интенсивно трещиноватые коренные андезибазальты. Матрица породы сложена смектитам, хлорит-смектитам и др. смешано-слоистыми минералами (до иллит-смектитов); многочисленные трещины и поры залечены кальцитом и минералами кремнезема. Из рудных минералов преобладает пирит. Другие сульфиды (сфалерит, халькопирит, киноварь) образуют вкрапленность в основной смектитовой массе и в карбонатных прожилках.

Гидротермальные глины имеют неоднородное слоистое строение за счет разных физико-химических и гидродинамических свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН № FWMЕ-2024-0005.

Нехорошев А.С. Гидротермальная деятельность района хребта Камбального на Южной Камчатке. Бюлл. вулканол. станций. 1959. № 28. С. 23-32.

Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И. Чернов М.С., Кравченко О.В., Карташева Е.В. Состав, строение и происхождение карбонатных конкреций Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка). Вулканология и сейсмология. 2021. 4. 45-60.

Рычагов С.Н., Сергеева А.В., Чернов М.С. Специфические минеральные ассоциации гидротермальных глин (южная Камчатка). Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 1. С. 81-86.

Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Нуждаев И.А., Букатов Ю.Ю., Абкадыров И.Ф. Слоисто-блоковая структура Паужетского геотермального месторождения (Камчатка). М.: ГЕОС. 2025. 170 с.

«Контейнеры и свидетели»: глинистые минералы как индикаторы условий сегрегации ЭПГ в измененных ультрабазитах массива Дюкали (Хабаровский Край)

Б.Б. Левочский^{1,2}, Т.Ю. Якич³

Исследования механизмов концентрирования ЭПГ в ультраосновных породах традиционно связывают их с первичными магматическими фазами: сульфидами (Barnes et al., 2017), хромшпинелидами (Park et al., 2012; Степанов, 2015) или несмесимыми «нагетсами» (Kamenetsky et al., 2015). Однако при серпентинизации и гидротермальных процессах ЭПГ нередко формируют аномалии с вторичными глинистыми минералами (Augé et al., 1988; Tolstykh et al., 2019). Ключевой вопрос – является ли эта связь случайной или отражает сорбцию ЭПГ глинистыми фазами, зависящую от условий минералообразования (pH, Eh, флюидного режима).

В работе приводятся результаты исследования 30 штучных образцов серпентинизированных и хлоритизированных перидотитов м. Дюкали (Хабаровский край) с повышенными содержаниями ЭПГ (данные ICP-MS). Массив прорван меловыми-палеоценовыми гранитоидами (Юрченко, Добкин, 2020). Ранее здесь авторами были обнаружены *кабриит* ($\text{Pd}_{1.99-2.07}\text{Cu}_{0.92-0.97}\text{Sn}_{1.02-1.07}$), *ирарсит* ($\text{Ir}_{0.78-0.82}\text{Pt}_{0.14-0.15}\text{As}_{1.02-1.07}\text{S}_{0.99-1.06}$) и *арсенид иридия* ($\text{Ir}_{1.1}\text{As}_{0.9}$), ассоциирующие с поздним магнетитом и серпентином (Левочский и др., 2024). В настоящей работе аналитический комплекс методов, применяющийся для изучения образцов, включал: сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и рентгенодифракционный анализ (РДА). Помимо вышеперечисленных минералов ЭПГ, обнаруженных в м. Дюкали авторами ранее в результате настоящего исследования впервые для м. Дюкали установлены *потэрит* ($\text{Pd}_{1.02}\text{Hg}_{0.98}$) (рис. А,Д); *томамаэит* ($\text{Cu}_{2.94-2.97}\text{Pt}_{1.01-1.05}$) (рис. Б, Ж); *татьянаит* с примесью Pd и Ni ($\text{Pt}_{5.18}\text{Pd}_{1.07}\text{Ni}_{2.49}\text{Cu}_{3.79}\text{Sn}_{3.46}$) (рис. Б); самородная платина с примесью Cu и Ni (рис. В); интерметаллические соединения Pd,Ni,Cu,Sb,Sn, отвечающие формуле $(\text{Ni}_{1.18-4.81}\text{Pd}_{0.43-2.88}\text{Cu}_{0-1.2})(\text{Sn}_{0.24-1.34}\text{Sb}_{0.38-1.15})$ (Рис. Г). Также в ассоциации с кабриитом установлен *паркерит* с примесью Cu ($\text{Ni}_{2.78}\text{Fe}_{0.19}\text{S}_{2.97}(\text{Bi}_{1.01}\text{Pb}_{0.96}\text{Cu}_{0.18})\text{S}_{2.15}\text{S}_{1.87}$ (Рис. Е). Паркерит впервые описан авторами (Левочский и др. 2025). и в сопряженном с изучаемым массивом м. Икчука (Хабаровский Край), где появление специфичной Ni минерализации авторы объясняют внедрением поздних гранитоидов и повторным прогревом ультрабазит-базитовых породных ассоциаций с инициацией нового флюидного потока, способствующего формированию вторичных минералов

¹ Хабаровский филиал АО «Полиметалл УК»,

² ИТИГ ДВО РАН, Хабаровск, levochskiiBB@polymetal.ru

³ ТПУ, Томск, yakichtu@tpu.ru

от относительно высокотемпературного режима (тремолит, андрадит, роговая обманка), до низкотемпературного (серпентин, хлорит, кальцит, тальк) на последующих гидротермально-метасоматических стадиях с переотложением первичных металлов (Ni, Fe) и участием привнесенных гранитогенных элементов (Bi, Sn, Pb). В ассоциации с кобальтовым пентландитом в м. Дюкали обнаружено интерметаллическое соединение золота и олова (рис. И). Находки *томамазита* отмечены в немногочисленных публикациях и как правило, характерны для пород зональных базит-ультрабазитовых комплексов урало-аяскинского типа и в связанных с ними россыпей (Шарыгин и Михайлов, 2022). Формирование *томамазита* большинство исследователей относят к стадии постмагматической переработки первичной ассоциации минералов ЭПГ, приуроченной к серпентинизации ультраосновных пород (Козлов и др. 2011, Степанов 2015). Помимо серпентина в отдельных пробах с ЭПГ минерализацией м. Дюкали, например, в сростании с *томамазитом* и *татьянаитом* (рис. Б), а также *потэритом* и *хизлебудитом* (рис. Д), авторами впервые для м. Дюкали отмечен *кронштендит* – железистая разновидность серпентина с примесью Ni, Ca, Al, ранее впервые описанная авторами в Талнахском Cu-Ni-Pt месторождении (Yakich et. al., 2024).

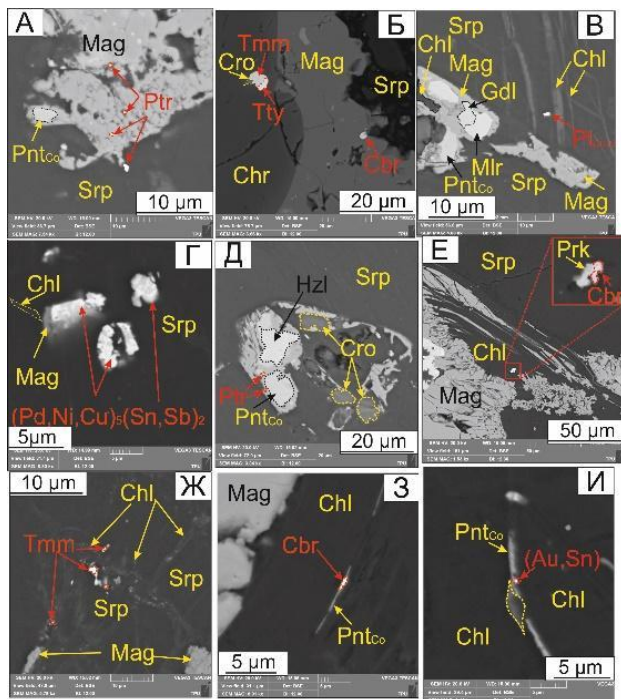


Рис.1. Микрофотографии ЭПГ-минерализации в ассоциации со вторичными глинистыми минералами: Mg-серпентином (Srp) (А-Ж); кронштендитом (Cro)

(Б,Д); хлоритом (Chl) (В,Г, Е-И) и магнетитом (Mag), возникающим при серпентинизации перидотитов м. Дюкали в обратно-отраженных электронах сканирующего электронного микроскопа (оператор Якич Т.Ю.). Ptr – потэрит, Pnt_{co} – Со-пентландит, Srp – серпентин, Tmt – томамазит, Tty – татьянаит, Cbr – кабриит, Gdl – годлевскит, Mlr – миллерит, Hzl – хизлевудит

Согласно данным рентгеноструктурного порошкового анализа валовых проб в образцах, содержащих ЭПГ-минерализацию (по данным СЭМ) помимо первичных минералов перидотитов, представленных, главным образом, оливином (12.8-28.4 об.%) и диопсидом (15.3-28.2 об.%) повсеместно распространены такие вторичные минералы, как *серпентин*: лизардит - 1Т (от 9.4 до 42.6 об.%), значительно реже - 1М (ед. случай - 45.1 об.%), антигорит - 8М (реже - 15.2-22.4 об.%), клинохризотил (29.3-41.8 об.%), *хлорит*: клинохлор (13.5 об.%), также встречается *актинолит* (до 12.3 об.%). Таким образом, глинистые минералы (серпентин, хлорит, кронштендит) могут выступать активными сорбентами ЭПГ и тяжёлых металлов (Sn, Ni, Au, Cu), что указывает на их значимую роль в эпигенетическом переотложении и концентрировании этих элементов в условиях постмагматических флюидных процессов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Государственного задания Наука № FSWW-2023-0010.

Augé T., Legendre O., Maurizot P. Platinum-group element distribution in the Alaskan-type mafic-ultramafic complexes of the Dumbea River area (New Caledonia). *Economic Geology*, 1988, 83(6), 1247–1260.

Barnes S.J., Holwell D.A., Le Vaillant M. Magmatic sulfide ore deposits. *Elements*. 2017. 13(2),89-95.

Park J.-W., Campbell I.H., Eggins S.M. Enrichment of Rh, Ru, Ir and Os in Cr spinels from oxidized magmas: Evidence from the Ambae volcano, Vanuatu. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. 78: 28-50.

Kamenetsky V. S., Park J.-W., Mungall J. E., Pushkarev E. V., Ivanov A. V., Kamenetsky M. B. and Yaxley G. M. Crystallization of platinum-group minerals from silicate melts: Evidence from Cr-spinel-hosted inclusions in volcanic rocks. *Geology*. 2015. 43, 903–906.

Tolstykh N.D., Zhitova L.M., Shapovalova M.O., Chayka I.F. The evolution of the ore-forming system in the low sulfide horizon of the Noril'sk 1 intrusion, Russia. *Mineralogical Magazine*, 2019. 83(5): 673-694.

Yakich T. Yu., Zhimuleva E. S., Rudmin M. A., Ruban A. S., Maximov P. N. & M. V. Shaldybin. The first identification of cronstedtite in Cu–Ni–PGE ores of the Talnakh intrusion. *Scientific Reports* 2023, 13, 22437

Козлов А.П., Чантурия В.А., Сидоров Е.Г., Толстых Н.Д., Телегин Ю.М. Крупнообъемные рудные месторождения платины в зональных базит-ультрабазитовых комплексах урало-аяскинского типа и перспективы их освоения. *Геология рудных месторождений*, 2011, 53(5), 419–437.

Левочский Б.Б., Якич Т.Ю., Левочская Д.В. Роль флюида в перераспределении и накоплении металлов платиновой группы и их сплавов на примере Дюкалинского мафит-ультрамафитового массива (Хабаровский край), «Металлогения древних и современных океанов. Рудогенез», 22-25 апреля 2024 г, г. Миасс, С. 191-195.

Левочский Б.Б., Якич Т.Ю., Кириллов В.Е. Состав аксессуарных хромшпинелидов и редкие минералы Ni в мафит-ультрамафитовых породах Икчукинского массива (Хабаровский край) «Металлогения древних и современных океанов-2025. От гипотез рудогенеза к критериям прогнозирования» 21–25 апреля 2025, г. Миасс. Т. 31. С. 209-213.

Степанов С.Ю. Онтогенез минералов платиновой группы в зональных ультраосновных массивах (Средний Урал). Онтогенез, филогенез и система минералогии. 2015, Миасс: ИМин УрО РАН, 182–186.

Шарыгин В.В., Михайлов И.Г. Томамазит Cu_3Pt в самородном осмии из речных отложений в Нижнесергинском районе, средний Урал. Минералогия, 2022, том 8, № 2, с. 5–14.

Юрченко Ю.Ю., Добкин С.Н. Отчёт о результатах работ по объекту «Проведение в 2017-2019 году региональных геолого-съёмочных работ масштаба 1:200000 на группу листов в пределах Дальневосточного ФО (южные районы). ГДП-200 (2-3 этапы) листа М-54-ХIII (Гурская площадь), 2020. №27809.

Структурно-минералогические особенности нижнехвалынских «шоколадных глин» Нижнего Поволжья

Р.Э. Мусаэлян¹, Б.А. Сахаров¹, Е.В. Щепетова¹

Позднеплейстоценовая история Хвалынского бассейна фиксируется в мощной толще, представленной переслаиванием глинистых, алевроитовых и песчаных отложений, известных под названием «шоколадные глины». Эти осадки широко распространены в пределах Нижнего Поволжья и Северного Прикаспия и сформировались в условиях интенсивной трансгрессии раннехвалынского времени, когда уровень Каспийского моря достигал +50 м н.у.м. Это явление обусловило перенос и аккумуляцию крупных объёмов терригенного материала из различных источников в бассейн древнего Каспия (Менабде, 1989; Макшаев, 2019). Сложный фациальный облик шоколадных глин и их высокая латеральная изменчивость породили многочисленные гипотезы относительно их генезиса. Наряду с предполагаемым влиянием уровня моря и климата, особое значение в реконструкции условий формирования отложений приобретает литолого-минералогический анализ, в первую очередь — изучение состава и структуры глинистой фракции. Исследование глинистых минералов позволяет не только судить о характере и изменчивости палеообстановок (Chamley 1989; Куприн, 2003; Ehrmann, 2007), но и установить потенциальные провинции сноса осадочного материала, степень его преобразованности в ходе диагенеза и характер постседиментационных изменений.

В рамках данной работы были проанализированы образцы из разрезов Райгород и Средняя Ахтуба, расположенных на противоположных берегах Волги и Ахтубы соответственно. Из общей выборки в 42 образца были отобраны 10, представляющие два литологически контрастных типа: глинистые и алевро-песчаные прослои. Ранее на этих разрезах уже проводилось определение минерального состава методом Бискайя, позволившим сделать предварительное заключение о наличии разнородных источников сноса (Мусаэлян, 2022). Однако этот метод, основанный на геометрической аппроксимации пиков рентгеновских дифрактограмм, имеет существенные ограничения, особенно при оценке доли смешанослойных минералов. Поэтому целью повторного исследования стало применение метода оптимального моделирования экспериментальных дифрактограмм, обеспечивающего более точную количественную и структурную характеристику глинистых фаз.

Полученные результаты показали принципиальные отличия от предыдущих интерпретаций. В обоих литологических типах доминирует

¹ ГИН РАН, Москва, romaniero1@gmail.com

смешанослойная фаза слюда-сметит, доля которой достигает 72-81 %. Различия между глинистыми и алевро-песчаными слоями касаются не столько общего состава, сколько внутренней структуры слюда-сметитовых агрегатов. Так, в глинистых прослоях наблюдается высокая степень упорядоченности: соотношение слюдистых и сметитовых слоев составляет в среднем 0.70:0.30, а среднее число слоёв в кристалле варьирует от 10 до 14. В алевролитах же были выделены два различных структурных типа: первый характеризуется аналогичным соотношением слоёв 0.62:0.38 и N около 6, а второй – резко смещённым балансом в пользу сметита (0.30:0.70) при среднем числе слоёв 4. Эти данные свидетельствуют о деградации исходной слюда-сметитовой фазы в более проницаемых и дренируемых условиях, что характерно для алевролитопесчаных литотипов. При этом химический состав глинистых минералов по основным катионам (Al, Mg, Fe, K) остаётся стабильным в пределах обеих групп, указывая на их происхождение из единой минералогической провинции.

Таким образом, использование метода моделирования рентгеновских дифрактограмм позволило пересмотреть выводы, сделанные на основе полуколичественного анализа. Полученные данные подтверждают единство источника терригенного материала и отвергают предположение о наличии нескольких питающих провинций. Минералогические различия между глинистыми и алевро-песчаными слоями объясняются не разным составом исходного материала, а различиями в постседиментационной трансформации, зависящей от литологической разности и гидродинамических условий осадконакопления. Деградация смешанослойной фазы (Милло, 1968) в алевролитах интерпретируется как результат раннедиагенетических процессов (Шутов, 1975), происходивших в условиях активного фильтрационного режима, с последующим формированием менее упорядоченных структур. Таким образом, выявленные структурные особенности не только отражают условия осадконакопления и раннего диагенеза, но и позволяют использовать параметры смешанослойных образований как индикатор фациальных изменений в пределах позднелетистического морского бассейна. Интеграция полученных минералого-структурных данных позволяет уточнить представления о локальных условиях осадконакопления в пределах Хвалынского бассейна и указывает на влияние литологически контролируемых постседиментационных процессов, отражающих микрофациальную неоднородность при общей стабильности источника сноса осадков.

Проведённое исследование представляет собой первый этап более широкого анализа: в дальнейшем планируется расширение географического охвата, включение новых разрезов и литотипов, а также сопоставление с

данными по другим минеральным фракциям, что позволит более полно реконструировать палеоусловия формирования шоколадных глин.

Работа выполнена за счет Субсидии на высшее образование.

Менабде И.В. Палеогеография позднего плейстоцена Нижнего Поволжья. Автореф. дис. М.: МГУ, 1989. – 24 с.

Макшаев Р. Р. Палеогеография Среднего и Нижнего Поволжья в эпоху раннехвалынской трансгрессии Каспия // Автореф. дисс. ... к. г. н. М.: МГУ. 2019

Chamley, H. Clay Sedimentology / H. Chamley. — Berlin: Springer-Verlag, 1989. — 623 p.

Куприн П. Н., Ферронский В. И., Поповчак В. П., Шлыков В. Г., Золотая Л. А., Калишева М. В. Состав донных осадков Каспийского моря как показатель изменения его водного режима // Водные ресурсы. 2003. Т. 30, № 2. С. 154–172.

Ehrmann W., Schmiedl G., Hamann Y., Kuhnt T., Hemleben C., Siebel W. Clay minerals in late glacial and Holocene sediments of the northern and southern Aegean Sea // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2007. Vol. 249. P. 36–57.

Мусаэлян Р.Э., Лебедева М.П., Ростовцева Ю.В., Варламов Е.Б. Литолого-минералогическая характеристика нижнехвалынских шоколадных глин Нижней Волги (на примере разрезов Райгород и Средняя Ахтуба). Геоморфология. 2022.V. 53(3). С. 96-106.

Милло Ж. Геология глин (выветривание, седиментология, геохимия). Л.: Недра, 1968. 360 с.

Шутов В.Д. Минеральные парагенезы граувакковых комплексов. М.: Наука, 1975 (Тр ГИН АН СССР; Вып. 278).

Глинистые породы венд-кембрийских отложений северо-восточной части Балтийской моноклинали

В.Н. Подковыров¹, О.С. Верещагин²

В работе рассматривается минералогия глинистых отложений верхнего венда и нижнего кембрия северо-восточной части Балтийской моноклинали, которые позволяют проследить смену источников осадконакопления, палеоклимата и постдиагенетические преобразования глинистых пород (Менс, Пиррус, 1971; Подковыров и др., 2017). Переходные отложения верхнего венда и нижнего кембрия в северо-восточной части Балтийской моноклинали, представлены валдайской и балтийской сериями (Стратиграфия..., 1979). Валдайская серия включает старорусскую и василеостровскую свиты венда, балтийская серия нижнего кембрия представлена ломоносовской и сиверской свитами. Исследования базируются на данных, полученных при изучении керна скважин Уткина Заводь (Санкт-Петербург), Коровье-8 (правый берег р. Сясь) и Шоткуса-1 на востоке Ленинградской области.

Нижняя часть старорусской свиты представлена в разрезе скважины Уткина Заводь песчаниками с прослоями аргиллитов, а верхняя часть разреза сложена преимущественно пестроцветными аргиллитами. Осадочная система старорусской свиты включает отложения, которые формировались на морском мелководье (Подковыров и др., 2017).

Котлинский ярус представлен отложениями василеостровской свиты. В скважине Уткина Заводь свита сложена аргиллитами с прослоями сидерита перелаивающимися с редкими алевроито-песчаниками. Отложения василеостровской свиты накапливались в мелководно-морских условиях (Подковыров и др., 2017).

Вышележащие осадочные породы балтийской серии объединены в ломоносовскую и сиверскую свиты лонтовского горизонта нижнего кембрия (Стратиграфия..., 1979). Ломоносовская свита представлена переслаивающимися песчаниками, алевролитами и глинами. Свита перекрыта «голубыми» глинами и алевролитами сиверской свиты. Нижнекембрийские отложения балтийской серии отлагались в мелководном эпиконтинентальном бассейне континента Балтика (Менс, Пиррус, 1971; Подковыров и др., 2017).

Минеральный состав глинистых пород определялся методом рентгенодифракционного анализа. Порошки пород анализировались в гомогенизированных таблетках тетрабората лития. Потери при прокаливании (ППП) оценивали путем прокаливания предварительно

¹ ИГД РАН, Санкт-Петербург, vpodk@mail.ru

² СПбГУ, Санкт-Петербург, o.vereshchagin@spbu.ru

высушенных образцов (1 ч при 105 °С) в течение 2 ч при 920 °С. Рентгенофазовый анализ образцов глины проводили в Ресурсном центре СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» на дифрактометре Rigaku Miniflex II (излучение Co-ka), интервал съемки (2θ) 3-55 °, скорость съемки 2 °/мин, шаг 0,02 °.

Полученные рентгенограммы обрабатывали в программном пакете PDXL II. Для идентификации фаз использовали базу данных ICDD (PDF-2 / Release 2011 RDB).

Как показали наши рентгенодифракционные исследования, состав глинистой фракции в образцах старорусской свиты из скважины Уткина завод сравнительно однороден, с общим преобладание каолинита (рис. 1). Примеси смешанослойных минералов не обнаружено. Минеральный состав ломоносовской и сиверской свит нижнего кембрия (возрастание доли иллита и сокращение каолинита (рис.1) отражает преобладание физического выветривания в областях сноса при накоплении глин нижнего кембрия.

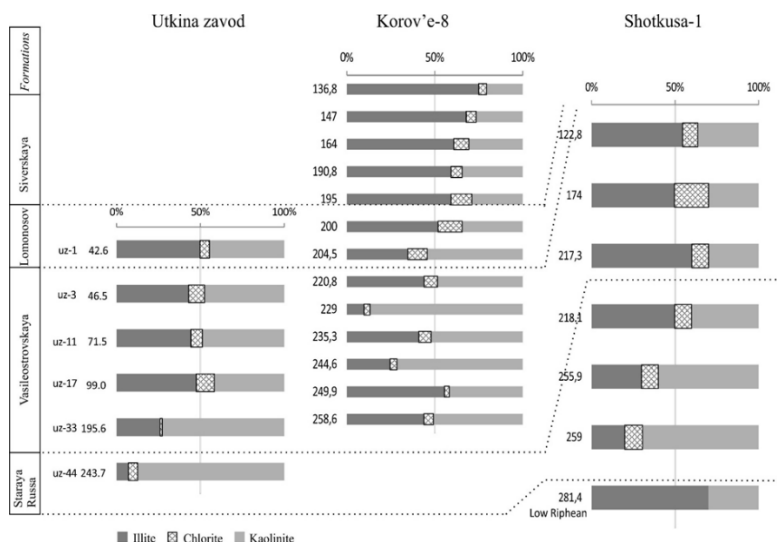


Рис. 1. Минеральный состав образцов глин скв. Уткина завод, Коровье-8 и Шоткуса-1

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта проекта FMUW-2021-0003 ИГГД РАН.

Голубкова Е.Ю., Кушим К.А., Плоткина Ю.В. Палеонтологическая характеристика пограничных отложений венда-кембрия северо-запада Русской плиты. Материалы LXII Сессии Палеонтологического общества. СПб.: Изд-в ВСЕГЕИ. 2016, 55–57.

Менс К.А., Пиррус Э.А. О стратиграфии пограничных слоев венда и кембрия на северо-западе Русской платформы. Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1971. № 11, 93–103.

Стратиграфия верхнедокембрийских и кембрийских отложений запада Восточно-Европейской платформы. М.: Наука. 1979, 236 с.

Подковыров В.Н., Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Ершова В.Б. Литостратиграфия и геохимия отложений верхнего венда–нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали. Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2017. 25 (1), 3–23.

Иллит в соленосной кунгурской толще нижней перми как индикатор стадии литогенеза

О.Б. Пономарев¹, И.И. Никулин²

Исследован минеральный состав водонерастворимого остатка из отложений кунгурской соленосной формации нижней перми Гремячинского месторождения. Образцы глинистой фракции являются основным объектом исследования, они отобраны из солей из керна скважин преимущественно погожской пачки. Отметим, что указанные образцы не представляют стратиграфической последовательности, однако, они отобраны из разных соляных слоев.

Образцы глинистой каменной соли растворялись в дистиллированной воде и отмыты до полного удаления хлоридов. Из полученного водонерастворимого остатка выделена фракция <0,01 мм, из которой путем осаждения в пробирке отобрана пелитовая фракция (<0,005 мм) по методике автора (Никулин, 2010). Ориентированные препараты были приготовлены путем осаждения глинистых частиц водной суспензии на предметное стекло с плотностью осажденной пленки – 3 мг/см².

В исследованном нами горизонте каменной соли гидрослюда в ассоциации с набухающим хлоритом, хлорит-монтмориллонитом и хлоритом являются аутигенными минералами, а аллотигенными является только каолинит. Каолинит, который мог сноситься с суши, в гиперсоленых условиях неустойчив: в начале он превращается в ди-триоктаэдрический монтмориллонит, а конечными продуктами ряда дальнейших превращений являются гидрослюда и хлорит.

Методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии, комплексного термического и химического анализов изучены глинистые минералы раннепермских сильвинитов Приволжской моноклинали. Ассоциация глинистых минералов пелитовой фракции водонерастворимого остатка сильвинитовых горизонтов Гремячинского месторождения состоит из хлорита и иллита с примесью неупорядоченных разнослоистых каолинит-сметкита и хлорит-сметкита; в некоторых образцах встречаются примеси серпентина.

Ширина пиков на полувысоте базальных рефлексов 10- и 5Å (преимущественно) 2M1-иллитового политипа [IC(002) и IC(004), соответственно], измеренные на воздушно-сухих и сольватированных глицерином образцах, позволила наметить обоснование

¹ ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург

² ИГЕМ РАН, Москва, iinikulin@gmail.com

степени преобразования глинистых минералов в исследуемых соленосных отложениях.

От галитовой к сильвин-карналлитовой пачке по рентгенографическим данным пакеты в структуре иллита имеют тенденцию к увеличению ширины пиков $IC(002) = 0,341$. Основное же количество характеристик иллита указывает на поздне-диагенетические условия (рис. 1).

Полученная информация указывает на то, что состав ассоциации из глинистых минералов отвечает соленосной формации, образованной в условиях интенсивного поступления К-Mg-рассолов в морскую воду повышенной солёности, для которой характерно уже ограниченное количество глинистых минералов. Исследованные нами глинистые минералы в сильвинитах и каменной соли Гремячинского месторождения, среди которых преобладает набухающий хлорит в ассоциации с хлорит-монтмориллонитовым ССМ и гидрослюдой являются преимущественно аутигенными.

Таким образом, в изученных фракциях солей Гремячинского месторождения (в скв. 11) термическое воздействие, отражающееся на значениях кристалличности иллита, увеличивается от каменной соли через сильвинит к магниевым солям. Максимальные термические изменения глинистых минералов отвечают позднему диагенезу и указывают на то, что на диагенез солей главным образом влияет глубина захоронения, а расслоение солей – вероятнее всего, это гидрохимический процесс, являющийся следствием литификации, но никак не сезонной седиментации.

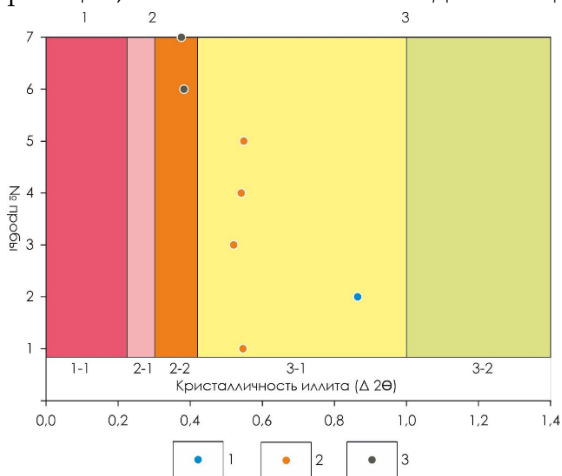


Рис. 1. Анализ уровня кристаллизации иллита по (Kubler, 1975) по данным дифрактометрических кривых в соленосных отложениях Гремячинского месторождения, скважина 11. Образцы из горизонтов: 1 – галитовый, 2 –

*сильвиновый, 3 – карналлитовый. Фации и зоны: зеленосланцевая 1-1 – эпизона;
пренит-пумплеитовая 2-1 высокотемпературная анхизона, 2-2
низкотемпературная анхизона; цеолитовая 3-1 позднего диагенеза, 3-2
начального диагенеза*

Никулин И.И. Экспресс-приемы выделения тонкодисперсных минералов из цемента осадочных пород // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2010. № 1. С. 286–292. EDN: MUHLRR.

Kubler B. Les argiles, indicateurs de métamorphisme. Rev. Inst. fr. Pétrole, 1975. 19. P. 1093-1112.

Диагенетические трансформации глинистых минералов в условиях просачивания метан-содержащих флюидов на примере донных осадков моря Лаптевых

А.С. Рубан¹, М.А. Рудмин¹, Е.С. Деева^{1, 2}

Глинистые минералы восприимчивы в изменениях условий диагенеза (Wilkinson et al., 2006; Jiménez Berrocoso et al., 2008), поэтому могут использоваться как минералогические маркеры специфических процессов вероятно и в отложениях метановых сипов. К примеру, в зонах анаэробного окисления метана глинистые минералы подвергаются биогенной редукции структурного Fe³⁺ под действием метаногенов (например, *Methanosarcina mazei*), что приводит к возникновению аутигенных фаз, включая смешанослойные иллит-сметтиты, вивинит и аморфный кремнезём (Zhang et al., 2012). С другой стороны, недавние исследования показали, что кристаллохимические характеристики филлосиликатов (например, межслоевые катионы калия в иллите) существенно ускоряют образование гидратов метана в нанопорах, изменяя концентрацию CH₄ в поровом пространстве донных осадков и оказывая влияние на скорости кристаллизации гидратных фаз. При этом ионы соли, напротив, замедляют этот процесс за счёт формирования гидратных оболочек (Mi et al., 2024). Это повышает значимость изучения изменений глинистых минералов в донных осадках метановых сипов для понимания интенсивности и масштабов флюидной разгрузки, а также определения минералогических индикаторов этих процессов.

Изученные осадки моря Лаптевых состоят преимущественно из кварца (40-54%), плагиоклазов (24-29%) и калиевых полевых шпатов (8-11%). Среди второстепенных компонентов идентифицированы диопсид, кальцит и доломит, однако их содержание в пробах не превышает 1-4%. Содержание глинистых минералов варьирует от 5 до 21%. Более детальный анализ минерального состава глинистой фракции показал, что доминирующими минералами в осадках метановых сипов и фоновых пробах являются иллит/мусковит и хлорит (рис. 1). Среднее содержание иллита среди глинистой фракции в сипах составляет 50%, а в фоновых осадках – 51.4%. Хлориты представлены в значимых количествах в обоих типах осадков (среднее 22.6-22.8%), что свидетельствует об их распространённости и стабильности по всему изученному району. Наиболее существенные различия обнаружены в содержании смектитов: в осадках сипов их среднее содержание составляет 5.8%, тогда как в фоновых пробах лишь 0.8%. Отмечено также

¹Томский политехнический университет, Томск, ruban@tpu.ru

²АО «ТомскНИПИнефть, Томск

снижение концентраций каолинита и смешанослойных минералов в сипах (11.8% и 10.7%, соответственно), по сравнению с фоновыми осадкам (13.3% и 11.8%, соответственно). Среднее содержание иллит, смешанослойных минералов, каолинита и хлорита снижаются в глинистой фракции осадков метановых сипов относительно фоновых осадков на 5%, что компенсируется увеличением среднего содержания смектитов.

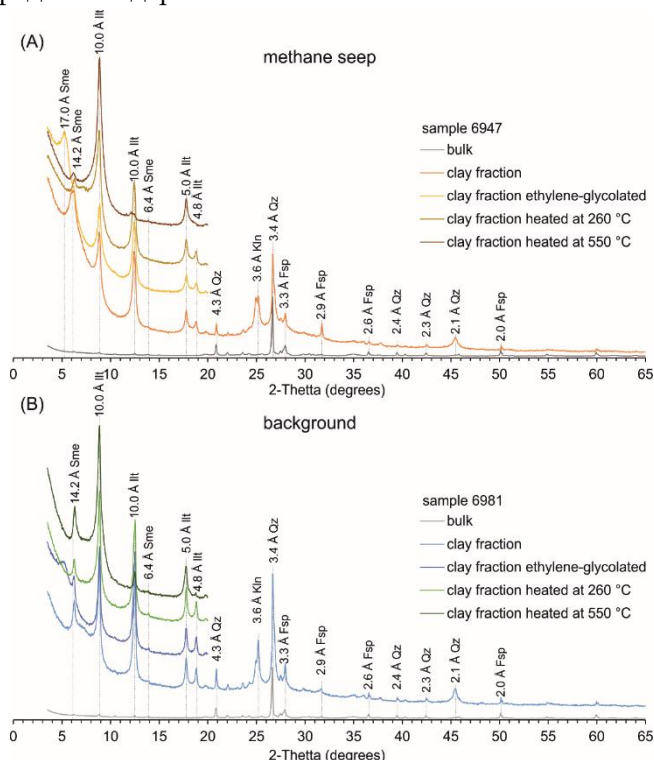


Рис. 1. РДА валового состава осадка и глинистой фракции: (А) осадка из метанового сипа, (В) фоновых осадков. Fsp – полевые шпаты, Ill – иллит, Kln – каолинит, Sme – смектит, Qz – кварц

Иллит в осадках сипов характеризуется более высоким содержанием $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ (среднее 11.3%) и MgO (среднее 3.8%) по сравнению с фоновыми пробами (среднее 9.7% и 2.9%, соответственно). Отмечено повышение содержания Na_2O (среднее 2.3% относительно 1.8% в фоне) и снижение SiO_2 (среднее 55.2% относительно 57.9% в фоне). По кристаллохимическим показателям иллит в сипах характеризуется более высокой долей железа в октаэдрических позициях, увеличенным соотношением $\text{Fe}_{\text{oct}}/(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Al})_{\text{oct}}$ и сниженным количеством алюминия в тетраэдрических позициях относительно фоновых осадков.

Смектиты и смешанослойные минералы (иллит-смектит, глауконит-смектит), распространенные в осадках метановых сипов, характеризуются высоким содержанием MgO (до 9.2%) и $Fe_2O_{3\text{общ}}$ (5.1-17.1%) и сравнительно низкими концентрациями K_2O (1.9-2.6%). Кристаллохимические параметры смектитов и смешанослойных фаз показывают повышенные значения железа и заметно большее содержание алюминия в тетраэдрических позициях. Такие изменения отражают вероятные процессы биогенной редукции $Fe(III)$ и аутигенного преобразования минералов в специфических условиях метановых сипов.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что глинистые минералы осадков метановых сипов Арктики подвергаются диагенетическим трансформациям под воздействием метановых флюидов. Основными признаками специфического диагенеза являются процессы железистой иллитизации, глауконитизации и аутигенного образования смектитов, стабилизирующихся в восстановительных условиях как результат обратного выветривания силикатов. В сиповых осадках выявлено систематическое повышение содержания Fe и Mg в октаэдрических позициях и снижение Si в тетраэдрических позициях иллитов и смешанослойных минералов, что подтверждает протекание биогенной редукции Fe^{3+} и замещения ионов в кристаллической структуре минералов, что отражает специфику диагенеза с участием метановых потоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-77-10002).

Jiménez Berrocoso, Á., Zuluaga, M.C., Elorza, J. Diagenesis, palaeoclimate and tectono-sedimentary influences on clay mineralogy and stable isotopes from Upper Cretaceous marine successions of the Basque-Cantabrian Basin (N Spain). *Cretaceous Research*. 2008. 29, 386–404.

Mi, F., He, Z., Jiang, G., Ning, F. What roles do interlayer cations (K^+) and salt ions (Na^+ and Cl^-) play in methane hydrate formation in illite nanopore? *Applied Clay Science*. 2024. 256, 107428.

Wilkinson, M., Haszeldine, R.S., Fallick, A.E. Jurassic and Cretaceous clays of the northern and central North Sea hydrocarbon reservoirs reviewed. *Clay Minerals*. 2006. 41, 151–186.

Zhang, J., Dong, H., Liu, D., Fischer, T.B., Wang, S., Huang, L. Microbial reduction of $Fe(III)$ in illite-smectite minerals by methanogen *Methanosarcina mazei*. *Chemical Geology*. 2012. 292, 35–44.

Типизация почв по гидротермальному градиенту в долине реки Гейзерной (Кроноцкий заповедник)

И.Н. Семенков¹, В.В. Крупская^{1,2}, М.П. Лебедева³, М.С. Чернов¹, О.В. Закусина², Г.В. Клинка⁴, А.В. Завадская⁵

Термальные ландшафты Долины гейзеров входят в объект Всемирного культурного наследия ЮНЕСКО «Вулканы Камчатки» и выделяются уникальным специфическим комплексом развивающихся здесь биогеоценозов. При этом эндотемпературные почвы, находящиеся в зонах воздействия выходов термальных вод и флюидов (парогидротерм), не рассматриваются как объекты практически ни в одной из почвенных классификаций и остаются одними из наиболее слабо изученных в России и мире (Гольдфарб, 2005; Semenov et al., 2021). Освоение таких территорий под строительство геотермальных электростанций сокращает и без того весьма небольшой ареал таких уникальных эндотемпературных по А.Н. Геннадиеву и др. (2007) почв. Долина реки Гейзерной за счет обилия, концентрации и разнообразия парогидротерм обладает высокой эстетической и биоценотической ценностью.

Данная работа посвящена комплексному и разномасштабному (на макро-, мезо- и микроуровнях) анализу сопряженного ряда почв в зоне воздействия парогидротермы с оценкой их химических и минералогических свойств.

На левом коренном берегу долины реки Гейзерной в средней части склона с перепадом высот 2 м и длиной 30 м от периферии до центра термального пятна выполнены геоботанические описания на квадратах 1×1 м, в центре которых заложены полнопрофильные почвенные разрезы, из которых погоризонтно отобрано 65 проб. Участок выбран в качестве представительного за свою округлую форму с кольцевой структурой растительного и почвенного покрова, не осложненной иными парогидротермами и не затронутой недавними экзогенными и антропогенными процессами. В пределах него выделено 4 зоны, в каждой из которой можно было заложить как минимум по 3 геоботанические площадки 1×1 м.

В почве измеряли температуру на глубинах 15 и 50 см с помощью контактного термометра «Техно-Ас ТК-5», цвет по шкале Манселла,

¹ МГУ, Москва, semenkov@geogr.msu.ru

² ИГЕМ РАН, Москва, krupskaya@ruclay.com

³ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, m_verba@mail.ru

⁴ Высшая школа экономики, Москва, galkaklink@gmail.com

⁵ Кроноцкий заповедник, Елизово, anya.zavadskaya@gmail.com

выполняли стандартизированное морфологическое описание. Во всех почвенных образцах определяли кислотность в водной суспензии (соотношение почва : раствор 1:2,5) в динамических условиях и окислительно-восстановительный потенциал; в водной вытяжке (1:5) – удельную электропроводность, щелочность титриметрически и катионно-анионный состав методом жидкостной хроматографии; гранулометрический состав на лазерном анализаторе частиц. Минералогический состав определен во всех валовых образцах и 2 образцах илистой фракции. На основе морфологических, химических и минералогических данных выбрано 4 разреза, наиболее представительных для каждой температурной зоны.

Для выявления значимых отличий между выборочными средними использовали односторонний критерий Манна-Уитни и поправку на множественное тестирование по методу Холма-Бонферрони с пороговым значением $p=0,05$. Детально все аналитические работы описаны в статье (Semenkov et al., 2021).

Почвы зоны 1 – наиболее холодная зона – Eutrosilic Silandic Andosols (Arenic, Cutanic) имеют температуру $<25^{\circ}\text{C}$ на глубине 15 см, структурированы (мелкокомковато-порошистая структура) в гумусовом горизонте за счет активной деятельности почвенной мезо- и микрофауны. Их минералогический состав типичен для вулканических почв. Среди глинистых минералов преобладает смектит (30% от всех минералов в валовом образце). Неглинистые минералы представлены преимущественно анортитом (30%). Существенна доля микроклина (9%) и клиноптилолита (8%). В материнских породах много полевых шпатов и смектита (в т.ч. новообразованного).

Почвы зоны 2 – слабо подогретые ($25-40^{\circ}\text{C}$) Eutrosilic Aluandic Andosols (Cutanic, Loamic, Natric), – лучше структурированы (среднекомковатый; по периферии зоны с элементами порошистости) в гумусовом горизонте за счет более тяжелого гранулометрического состава и большего содержания глинистого и коллоидного Fe-органического материала. Их минеральный состав очень схож с почвами зоны 1. По данным сканирующей электронной микроскопии в этих почвах обнаружены новообразованные пирит и кристобалит, а также морденит, изредка выстилающий крупные поры.

Материал почв зоны 3 – прогретых до $40-80^{\circ}\text{C}$ Eutrosilic Gleyic Aluandic Andosols (Loamic, Reductic, Protosalic, Hyperthionic) с бурой биогенной коркой (вместо гумусового горизонта) – хорошо преобразован гидротермальным процессом. На мезоуровне это проявляется в ожелезнении вулканогенных пород. На микро- и наноуровне исходная вулканогенная структура матрицы полностью преобразована. Среди глинистых минералов каолинита становится больше смектита (51 и 10% соответственно). Снижается доля неглинистых

минералов: микроклина, клиноптилолита, анатаза и кварца содержится по 4 – 7%.

Маломощные почвы зоны 4 – горячие ($>80^{\circ}\text{C}$) Gleyic Aluandic Andosols (Clayic, Reductic, Salic, Hyperthionic) с тонкой биогенной корочкой характеризуются полным гидротермальным преобразованием исходных пород и отличаются от остальных почв наличием бёмита. В минеральном составе преобладает каолинит (54%). На долю анатаза, кварца и кристобалита приходится по 7 – 8%.

В обследованном ряду почв от фоновых к подогреваемым флюидами снижается содержание гумуса, минералов песчаной фракции (альбита, анортита, микроклина) и эссенциальных элементов (Ca, K, Mg, Mn и Si), смектита; повышается кислотность, содержание тонких гранулометрических фракций и ряда элементов, поступающих с гидротермальными флюидами (Al, As, Co, Cr, Cu, Fe, Pb, Ti и V), появляется сульфатно-натриевое засоление, усиливается каолинитизация и ожелезнение. Таким образом, выявлено влияние пара и высокой температуры на синтез глинистых минералов: в зоне с наиболее высоким влиянием парогидротермы – синтезируется каолинит с примесью бёмита, гематита и пирита, все остальные минералы материнских пород (полевые шпаты, смектиты и др.) практически полностью растворяются.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-04-03818; полевые работы), государственного задания ИГЕМ РАН (исследование минерального состава), Почвенного института им. В.В. Докучаева (микроморфология) и МГУ имени М.В. Ломоносова (элементный состав и СЭМ) и с использованием дифрактометра «Ultima-IV», приобретенного в рамках реализации Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

Геннадиев А.Н., Гептнер А.Р., Жидкин А.П., Чернянский С.С., Пиковский Ю.И. Экзотемпературные и эндотемпературные почвы Исландии. Почвоведение, 2007. 6. 661–675

Гольдфарб И.Л. Влияние гидротермального процесса на почвообразование (на примере Камчатки. Дисс. ... к.г.н. 2005. 175 с.

Semenkov I.N., Klink G.V., Lebedeva M.P., Krupskaya V.V., Chernov M.S., Dorzhieva O.V., Kazinskiy M.T., Sokolov V.N., Zavadskaya A.V. The variability of soils and vegetation of hydrothermal fields in the Valley of Geysers at Kamchatka Peninsula. Scientific reports, 2021. 11. 11077

Формирование состава поглощенного катионного комплекса смектита Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка, Россия)

**А.В. Сергеева¹, С.Н. Рычагов¹, О.В. Кравченко¹,
Е.В. Карташева¹, А.А. Кузьмина¹, М.А. Назарова¹, А.Г.
Вахромеев²**

На юге Камчатки расположен вулканический хребет Камбальный, который характеризуется активной геотермальной деятельностью. Разгрузка термальных вод и парогазовых струй приводит к аргиллизации горных пород и формированию мощной (≥ 10 м) толщи гидротермальных глин вблизи дневной поверхности. Гидротермальные глины обладают особыми физико-химическими свойствами и несут богатейшую информацию о составе глубинного металлоносного флюида.

Южно-Камбальное Центральное термальное поле (ЮКЦ) выбрано в качестве модельного объекта в связи с установленным ранее влиянием восходящих щелочных термальных вод на процессы минералообразования в толще гидротермальных глин (Рычагов и др., 2021). Обычно в составе глин верхних горизонтов разреза преобладают минералы группы каолинита и сульфаты, но основная часть толщи сложена смектитом и к ней приурочены аномально высокие содержания благородных, цветных и редкоземельных элементов в твердой матрице глин и в поровых растворах (Рычагов и др., 2025). Поэтому в настоящей работе изучен состав катионного комплекса, поглощенного смектитом.

Для исследований отобраны 22 образца керна скважины ЮКЦ-1/24, последовательно от верхнего горизонта до основания толщи глин (см. ниже табл. 1). Образцы высушены, истерты, определен их минеральный состав методами рентгеновской дифрактометрии и инфракрасной спектроскопии. Далее образцы глин были отмыты от растворимых солей дистиллированной водой и получены буферные вытяжки путем выдержки навески в растворе, содержащем 2% NaCl и цитратный буфер с близкнейтральным pH. Цель подготовки вытяжки заключалась в вытеснении катионного комплекса из межслоевого пространства смектита.

Все изученные образцы глин состоят, в основном, из смектита и кальцита; количество кальцита закономерно растет с глубиной. В таблице 1 показано содержание некоторых элементов в составе поглощенного катионного комплекса смектита, с пересчетом на сухую глину. Содержание межслоевого лития составило порядка 1 ppm, а концентрации аммония и ртути оказались ниже предела обнаружения (в таблице не показаны). Редкие щелочные металлы концентрируются преимущественно в верхних частях разреза глин (см. табл. 1). Содержание Mg достигает 389 ppm, а Fe – 4625 ppm, но железо резко «уходит» из межслоевого пространства смектита глубоких

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, anastavalers@gmail.com

²ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», Красноярск, andrey_igr@mail.ru

частей толщи. В составе поглощенного катионного комплекса обнаружены Cu и Zn, что отвечает гидротермальным рудообразующим процессам. Медианное содержание Zn 29 ppm с максимумом 423 ppm, а Cu 0.55 ppm (до 20.4 ppm). Al в составе межслоевого катионного комплекса встречается только в верхней части разреза и, видимо, отражает форму нахождения элемента в растворе. Поведение Fe и Al коррелирует.

Смектит является катионообменником, поэтому элементы, находящиеся в составе анионных координационных соединений, не поглощаются. Наличие кальцита в составе образцов глины свидетельствует о близнеитральной или щелочной среде поровых растворов. Ранее было показано, что в основании толщи глин на термальных полях могут разгружаться щелочные напорные воды, с ними связана цеолитовая минерализация (Сандимирова и др., 2022). Видимо, в основании толщи глин ЮКЦ также разгружаются щелочные термальные воды, поэтому алюминий находится в анионной форме $[Al(OH)_4]^-$, а ближе к поверхности среда меняется на близнеитральную, Al переходит в гидратированную катионную форму $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ и поглощается смектитом. Hg в щелочных и слабощелочных средах находится в виде нейтральных или анионных координационных соединений, а аммоний – в виде нейтрального NH_4OH , оба теряют способность к катионному обмену. Железо в щелочной среде выпадает в осадок в виде малорастворимого гидроксида, но при понижении pH находится в виде гидратированного катиона, поэтому активно поглощается смектитом.

Таким образом, смектит ЮКЦ обогащается металлами, в зависимости от формы их нахождения в гидротермальном растворе.

Таблица 1. Содержание элементов в поглощенном катионном комплексе смектита, в пересчете на образец глины, ppm (н/о – не определено)

Проба	Глубина отбора, см	Al	Li	Rb	Cs	Mg	Zn	Fe	Cu
1	0-20	0.97	0.84	1.26	17.22	389	н/о	1264	3.5
3	40-60	3.02	0.89	1.33	2.94	50	н/о	1978	2.2
5	70-90	6.69	0.66	1.00	1.54	23	77	1597	20.4
6	90-110	7.51	0.43	0.62	0.85	17	26	2022	5.1
8	130-150	5.85	0.63	0.87	н/о	35	19	2136	2.6
10	170-190	6.71	0.18	0.21	н/о	21	423	3175	0.5
13	230-250	5.32	0.23	0.32	н/о	18	23	1532	0.3
15	270-290	4.57	0.22	0.29	н/о	15	24	1997	0.2
17	310-330	5.48	0.38	0.58	0.89	47	29	1457	10.2
19	370-390	1.90	0.21	0.27	1.07	177	40	4625	0.1

Проба	Глубина отбора, см	Al	Li	Rb	Cs	Mg	Zn	Fe	Cu
21	410-430	3.10	0.27	0.42	1.36	143	59	4105	0.6
23	470-490	1.55	0.31	0.48	1.56	109	73	2113	0.2
25	545-570	1.03	0.28	0.44	1.50	103	16	1475	0.6
27	600-630	< 0.04	0.38	0.57	3.11	120	н/о	92	0.4
29	650-670	< 0.04	0.31	0.48	1.99	114	н/о	69	0.5
31	690-710	< 0.04	0.31	0.96	5.35	70	н/о	37	0.4
34	770-790	< 0.04	0.31	0.42	1.75	122	н/о	53	0.7
36	810-830	< 0.04	0.16	0.48	3.30	61	н/о	33	0.3
38	850-870	< 0.04	0.24	0.30	2.02	123	н/о	45	0.6
40	890-910	< 0.04	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
44	970-990	< 0.04	0.33	0.51	3.00	126	н/о	54	0.7
46	1010-1030	< 0.04	0.30	0.86	7.06	62	н/о	35	0.4

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН № FWME-2024-0005, номер государственной регистрации 124032200003-7.

Рычагов С.Н., Сандиминова Е.И., Чернов М.С., Кравченко О.В., Карташева Е.В. Состав, строение и происхождение карбонатных конкреций Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка). Вулканология и сейсмология. 2021. 4. 45-60.

Рычагов С.Н., Сергеева А.В., Кравченко О.В., Кузьмина А.А. Макрокомпонентный состав и генезис поровых растворов гидротермальных глин Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка). Геология и Геофизика. 2025. 100. 1-21.

Сандиминова Е.И., Рычагов С.Н., Сергеева А.В., Чубаров В.М. Цеолитовая минерализация в аргиллизитах Восточно-Паужетского термального поля как индикатор разгрузки щелочного флюида в современной гидротермальной системе (Южная Камчатка). Вулканология и сейсмология. 2022. 6. 42-62.

Дифференциальная диагностика высокодисперсных слоистых силикатов в позднечетвертичных донных отложениях ледниковых озер Восточного Саяна

**П.А. Солотчин¹, Э.П. Солотчина¹, Е.В. Безрукова²,
А.А. Щетников², А.Н. Жданова¹**

На территории высокогорного массива Восточного Саяна расположено большое число озер различного генезиса, глубины и минерализации. Прилегающая к Байкальскому региону юго-восточная часть Восточного Саяна, в частности Жом-Болокский вулканический район, является труднодоступной территорией, однако в последние годы удалось получить литологические, биостратиграфические, геохимические данные из голоцен-позднеплейстоценовых разрезов донных осадков нескольких расположенных там озер (оз. Хара-Нур, оз. Каскадное-1, оз. ESM-1) (Безрукова и др., 2016; Shchetnikov et al., 2019). Вместе с тем, в этих работах минералогическо-кристаллохимические исследования отложений отсутствуют.

Объектом наших исследований послужили донные осадки озера Хикушка, расположенного в верховьях пади Хи-Гол («Долина вулканов»), являющейся частью Жом-Болокского базальтового лавового поля. Оз. Хикушка (абс. выс. 1956 м) имеет гляциальное происхождение и является пресноводным, площадь его водной поверхности составляет 0,3 кв. км, глубина более 40 м. Разрез осадков озера мощностью 124 см имеет двучленное строение. В интервале 88-124 см залегают однородные светло-оливковые алевритоглинистые осадки с соотношением фракций: мелкий алеврит – 45-50% и пелит – 50-55%. Выше по разрезу (0-88 см) залегает толща сероцветных глинистых алевритов (пелит – 30-40%, алеврит – 60-70%), насыщенных диатомеями (биогенно-терригенные илы).

Возраст изученных отложений лежит в диапазоне от ~ 13800 кал.л.н. до современности. Исходя из возрастной модели, граница между алевритистыми глинами и биогенно-терригенными илами на уровне 88 см соответствует переходу от плейстоцена к голоцену.

Литолого-минералогические исследования отложений проводились комплексом методов, включающим рентгеновскую дифрактометрию (XRD), ИК-спектроскопию, лазерную гранулометрию, рентгенофлуоресцентный анализ, радиоуглеродное датирование (AMS). По результатам XRD анализа и ИК-спектроскопии на протяжении всего разреза в осадках оз. Хикушка присутствуют слоистые силикаты, кварц, полевые шпаты и амфибол (рис. 1). Методом математического моделирования XRD-профилей слоистых

¹ИГМ СО РАН, Новосибирск, paul@igm.nsc.ru

²ИГХ СО РАН, Иркутск, bezrukova@igc.irk.ru

силикатов (Солотчина, 2009), выявлены их состав, количественные соотношения и структурные характеристики. Установлено, что ассоциация слоистых силикатов в осадках оз. Хикушка на всем протяжении разреза представлена хлоритом, иллитом, иллит-сметтитом, хлорит-сметтитом, мусковитом, вермикулитом и каолинитом, однако соотношения минералов существенно меняются от плейстоцена к голоцену.

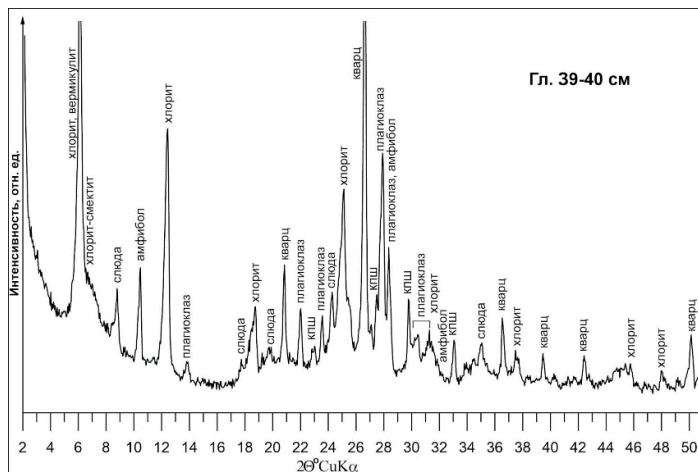


Рис. 1. XRD профиль образца 39-40 см донных отложений оз.Хикушка

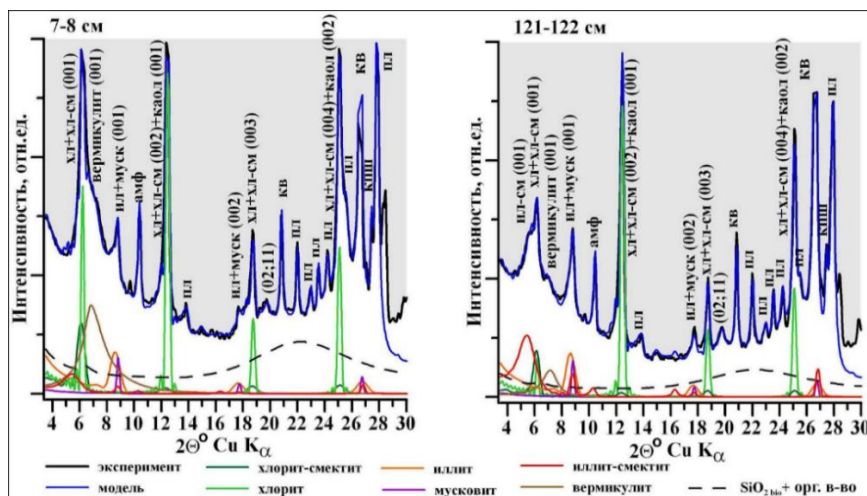


Рис. 2. Результаты моделирования XRD профилей слоистых силикатов в образцах оз. Хикушка: голоцен - 7-8 см, верхний плейстоцен - 121-122 см

В плейстоценовых осадках (рис. 2, обр. 121-122 см) среди слоистых силикатов преобладают иллит и смешанослойный иллит-сметтит, на долю которых приходится 47.5% от суммы слоистых силикатов, в подчиненном количестве присутствуют Fe,Mg-хлорит – 19.2%, мусковит с большими размерами доменов (до 40 слоев) – 13.3%, хлорит-сметтит – 10.0%, вермикулит – 5.0% и каолинит – 5.0%. В составе слоистых силикатов голоцена (рис. 2, обр. 7-8 см) преобладают Mg, Fe-хлорит и смешанослойный хлорит-сметтит, суммарное содержание которых составляет 45.8% от общего количества слоистых силикатов, в подчиненном количестве установлены иллит – 28.1%, вермикулит – 14.4%, мусковит – 6.7% и каолинит – 5.0%, следы иллит-сметтита. За исключением мусковита, присутствующие глинистые минералы тонкодисперсны, они имеют малые размеры доменов (от 5 до 15 слоев).

На основании проведенных литолого-минералогических и кристаллохимических исследований ассоциаций тонкодисперсных филлосиликатов выделен ряд стадий эволюции бассейна оз. Хикушка, осадконакопление в котором происходило под влиянием как климатических (деятельность ледников, колебания уровня озера, его биопродуктивность), так и геологических (состав пород водосбора) факторов. Позднечетвертичный вулканизм, несмотря на близкое расположение очагов его проявления, не играл существенной роли в процессах озерной седиментации.

Основные аналитические работы выполнены в «ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» Института геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск.

Безрукова Е.В., Щетников А.А., Кузьмин М.И., Шарова О.Г., Кулагина Н.В., Летунова П.П., Иванов Е.В., Крайнов М.А., Кербер Е.В., Филинов И.А., Левина О.В. Первые данные об изменении природной среды и климата Жомболокского вулканического района (Восточный Саян) в среднем-позднем голоцене. Доклады Академии Наук. 2016. 468 (3), 323–327.

Солотчина Э.П. Структурный типоморфизм глинистых минералов осадочных разрезов и кор выветривания. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2009. 234 с.

Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments. Journal of Asian Earth Science. 2019. 173, 291–303.

Глинистые образования гидротермального генезиса и особенности структурных контактов в них

**М.С.Чернов¹, В.Н. Соколов¹, В.В. Крупская^{1,2},
А.Б. Ермолинский¹, О.В. Разгулина¹**

Исторически гидротермальные глинистые образования относят к последней (финальной) стадии процесса гидротермальной аргиллизации. Впервые термин «аргиллизация» был употреблен в словаре Ф.Ю. Левинсона-Лессинга 1893 г. Однако, в то время термин «аргиллизация» не вошел в употребление. В 1941 г. Т.С. Лавринг для обозначения продуктов гидротермального изменения пород ввел понятие «глинистое изменение» (argillic alteration), производным от которого явился термин «аргиллизация». Это было второе рождение термина, на этот раз ставшего популярным. При этом, в основу содержания термина «аргиллизация» был положен минеральный состав новообразований, а не свойства пород (Волостных, 1972).

В современном понимании аргиллизация – это процесс замещение ряда минералов вмещающих пород глинистыми минералами, и относится к одному из типичных процессов гидротермального преобразования алюмосиликатных пород. При этом, под гидротермальным процессом понимается взаимодействие гидротерм с вмещающими горными породами, происходящее в результате изменения физико-химических условий при циркуляции растворов в земной коре или в отдельных геологических структурах (гидротермальных системах) (Бортников, 2022).

Исходя из этого, гидротермальные глинистые образования можно определить как результат процесса гидротермального преобразования алюмосиликатных пород, приводящий к замещению первичных минералов глинистыми минералами, и происходящий при взаимодействии гидротерм с вмещающими горными породами, за счет изменения физико-химических условий при циркуляции растворов в земной коре или в отдельных геологических структурах (гидротермальных системах).

Проявления процессов аргиллизации, сохранившиеся до наших дней, в основном распространены в породах послепермского времени. Однако наиболее древними из известных месторождений полезных ископаемых, залегающих в аргиллизированных породах, являются породы С – Р возраста. Месторождения полезных ископаемых Забайкалья с околорудной аргиллизацией: Талатуйское, Ново-Широкинское, Жирекенское и др. – примеры проявлений аргиллизации, которые образовались в юрскую и меловую эпохи. Современное же рудообразование, сопровождающееся

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, chernovms@my.msu.ru

² ИГЕМ РАН, Москва, krupskaya@ruclay.com

аргиллизацией пород, известно на полуострове Камчатка и Курильских островах (Волостных, 1972).

По возрасту гидротермальные глинистые образования можно разделить на три группы: древние или до четвертичные, приуроченные в основном к околорудным ореолам аргиллизации; молодые или четвертичные, приуроченные к районам четвертичного вулканизма и завершившим процесс аргиллизации; современные, приуроченные к районам современного вулканизма, с незавершенным процессом аргиллизации и часто характеризующиеся повышенной температурой.

Под современными гидротермальными глинистыми грунтами мы понимаем первый от поверхности глинистый горизонт, формирующийся в результате гидротермальных преобразований поверхностных образований и развитый в пределах термальных полей – мест естественной разгрузки гидротермальных систем в районах современного вулканизма (Чернов и др., 2021).

По данным многолетних авторских исследований был проведен анализ минерального состава, строения, состояния, свойств, а также микроморфологических особенностей (по результатам изучения микро- и наностроения образцов грунтов методом сканирующей электронной микроскопии) контактов между структурными элементами глинистых образований гидротермального генезиса. Обобщение результатов анализа, позволило сделать следующие выводы.

1. Массивы гидротермальных глинистых грунтов различного возраста имеют зональное строение. Каждая из зон характеризуется различным составом глинистых минералов и преобладающим типом контактов между структурными элементами.

2. Наблюдается закономерное изменение преобладающего типа контактов между структурными элементами современных гидротермальных глинистых грунтов сверху вниз: коагуляционный – переходный → коагуляционный → коагуляционный – переходный → переходный – фазовый.

3. Для современных гидротермальных глинистых грунтов характерно гетерогенное микростроение. В пределах одного образца встречаются области с различным минеральным составом, микростроением и преобладающим типом структурных контактов.

4. Преобладающий тип контактов между структурными элементами некоторых горизонтов современных гидротермальных глинистых грунтов не всегда является определяющим фактором для их свойств, в частности их прочности. Это связано с формированием в таких грунтах объемного

структурного каркаса из минералов группы SiO_2 , характеризующийся более жестким кристаллизационно-цементационным типом контактов.

5. Дочетвертичные гидротермальные глинистые образования чаще всего характеризуются более однородным микростроением, чем современные, с преобладанием контактов коагуляционного и переходного типов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, и проведены с применением оборудования, приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета (рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV (Япония), растровый электронный микроскоп LEO 1450VP (Германия), рентгеновский компьютерный микротомограф Yamato TDM1000H-II и лазерный анализатор размера и заряда частиц Horiba SZ-100 (Япония)).

Волостных Г.Т. Аргиллизация и оруденение. Москва: Недра, 1972. 240 с.

Бортников Н.С. Гидротермальные процессы // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: <https://bigenc.ru/c/gidrothermal-nye-protsessy-fbeae7/>. – Дата публикации: 30.11.2022.

Чернов М.С., Крупская В.В., Соколов В.Н. К вопросу о формировании свойств глинистых грунтов термальных полей: трансформация минерального состава и микростроения (на примере южной Камчатки) // Ломоносовские чтения 2021 года. Секция Геология. Подсекция Инженерной и экологической геологии. – URL: <https://lomonosov-msu.ru/rus/event/6740/>.

Состав глинистой фракции песчаных пород нефтегазоносных пластов юры и мела в отношении химического состава вмещающих ее пород (Западная Сибирь)

М.В. Шалдыбин¹

Исследовались образцы керна глубокой скважины, вскрывшей разрез последовательности обломочных горных пород одного из нефтяных месторождений (район Широкого Приобья) локализованного в пределах Западно-Сибирского осадочного бассейна. Были исследованы минеральный состав и состав глинистой фракции для продуктивных песчаных пластов мелового возраста: БС11, БС16, Ачимовского горизонта, а также пластов группы «Ю» (ЮС2, ЮС3, ЮС4) юрского возраста в интервале их залегания 2600-3300 метров. Глинистая фракция песчаных пород изучалась на предмет содержания в них глинистых минералов: каолинита, хлорита и иллита, которые были изучены раздельно, а также был изучен химический состав песчаников.

Минералогический состав пород и содержание глинистых минералов в песчаниках определялся дифрактометрическим методом на рентгеновском дифрактометре Rigaku-Ultima-IV. Химический состав песчаных пород определялся вакуумным рентгенофлуоресцентным кристаллодифракционным спектрометром СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM.

Литологически изученные песчаные породы содержат стандартный типовой состав обломков: кварц, полевые шпаты, обломки пород, при малой доли обломки слюдистых и аксессуарных минералов. Цементирующим материалом для обломков выступает глинистый материал, реже карбонатный цемент, представленный кальцитом, доломитом и сидеритом (больше для пород юрского возраста) различной интенсивности (от 0 до 20%). Типовой состав, а также содержание минералов включая глинистые представлены на рисунке 1.

По гранулометрическому составу песчаные породы мела (валанжин+берриас) характеризуются микрозернистой структурой при стремлении их к крупнозернистым алевролитам, но при малой доли глинистой фракции, обычно не превышающей 2%. Основным глинистым минералом в них является хлорит (60-80%) при подчиненной доли иллита и каолинита. Максимальные содержания хлорита встречаются для песчаных пород ачимовского горизонта (в среднем 76%). Ранее такая закономерность была выявлена для ряда других скважин (Shaldybin et al, 2021).

¹АО «ТомскНИПИнефть», Томск, shaldybinMV@tomsknpi.ru

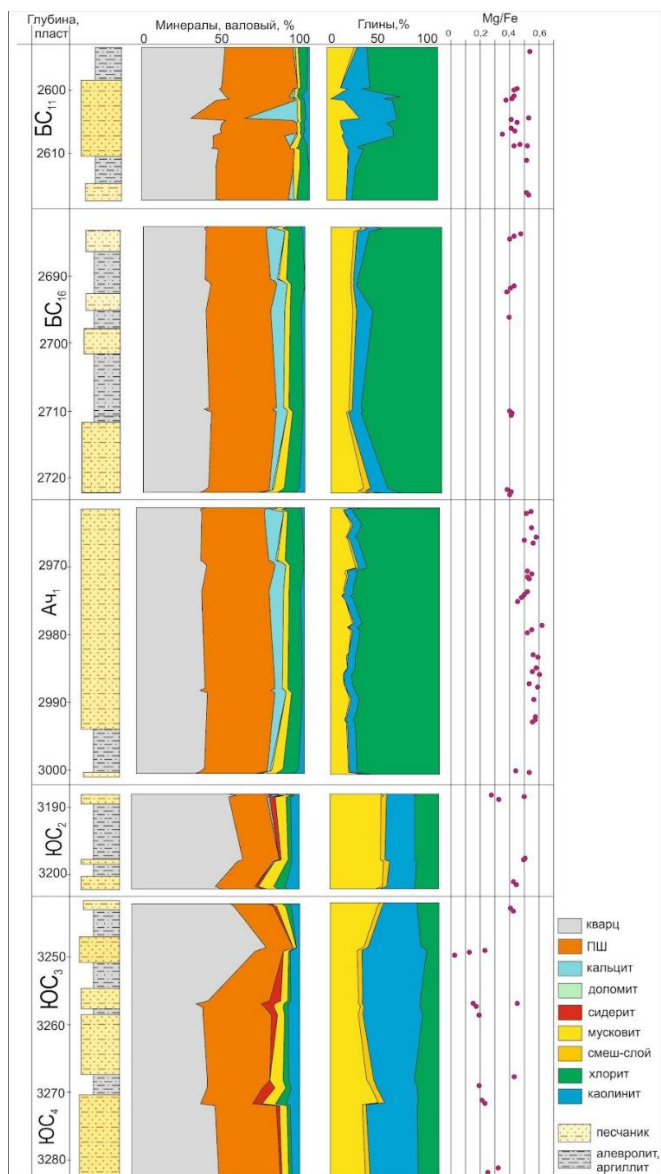


Рис. 1. Литологический разрез по скважине Широтного Приобья: валовая минералогия, состав глинистой фракции и отношение MgO/FeO

Песчаники группы Ю в свою очередь характеризуется мелко-и среднезернистым составом при валовой доле глинистой фракции обычно

более 6% (до 15%), представленной в основном каолинитом (более 50%) при подчиненной доли хлорита и иллита.

Химический состав изученных пород характеризуется нормальным составом компонентов, отвечающих составу обломочных (песчаных) пород, по содержанию Si, Al, K, Na, Ca отвечающих питающим провинциям кислых и средних магматических и метаморфических пород как источников поступления осадочного материала. Однако заслуживает внимания повышенные содержания MgO для меловых пластов, которые достигают максимума для пород ачимовского горизонта и убывают к верху разреза. Отношение MgO/FeO , показанное на рис.1, на наш взгляд обусловлено содержанием в песчаных породах магнезиально-железистых компонентов, главным из которых является хлорит, который вероятно может содержаться, как в магнезиальной (клинохлор), так и в железистой (шамозит) форме.

Преобладание хлорита и высокие содержания MgO для меловых пород относительно юрских связано с возможным влиянием других источников питания обломочного материала, имевших вулканическое происхождение. Это подтверждается локальными находками в песчаных породах обломков непосредственно вулканогенных пород, а также обломков с повышенным содержанием хлорита в петрографических шлифах. В породах юрского возраста хлорит также встречается, но в подчиненном количестве, а распределение MgO/FeO носит хаотичный характер, который обусловлен распределением черных слюд (биотит) часто встречающихся в обломочных породах юрского возраста.

Shaldybin M.V., Wilson M.J., Wilson L., Muslimova A.V., Cherdantseva D.A., Molokov P.B. Jurassic and Cretaceous clastic petroleum reservoirs of the West Siberian sedimentary basin: Mineralogy of clays and influence on poro-perm properties. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2021. 222. 104964.

МАТЕРИАЛЫ
VII Российского Совещания по глинам и глинистым
МИНЕРАЛАМ – ГЛИНЫ-2025

СЕКЦИЯ СЗ: Свойства глин и слоистых материалов, их
ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Получение геополимерных материалов на основе природных глинистых минералов

А.А. Алексеев¹, Ю.А. Аликина¹, О.Ю. Голубева¹

Геополимеры – алюмосиликатные полимерные материалы. Общая формула геополимера, может быть представлена в следующем виде: $M_n[(SiO_2)_z - AlO_2 -]_n \cdot wH_2O$, где M – катион (Na^+ , K^+), n – степень поликонденсации, $z \geq 1$ (Sbahieh, 2023). Образование данных материалов происходит в результате взаимодействия раствора щелочного активатора и алюмосиликатного прекурсора (каолин, галлуазит, бентонит, зола-уноса, красный шлам, металлургические шлаки). Геополимерные материалы характеризуются высокими прочностными свойствами, термостабильностью, химической стойкостью по отношению к агрессивным химическим средам. Основными областями применения данных материалов являются экологичное строительство с применением аддитивных технологий, получение покрытий, носителей катализаторов, пористых, огнеупорных, вяжущих и биосовместимых материалов, а также иммобилизация радиоактивных и токсичных отходов.

Наиболее широко используемым прекурсором для получения геополимеров является каолин ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), который обладает высокой пуццолановой активностью и простым химическим составом. В то же время работ, посвященных использованию других глинистых минералов, например, бентонита, в качестве сырья для синтеза геополимеров существенно меньше. , хотя данный материал также отвечает всем требованиям к прекурсорам геополимеров. В данной работе изучается возможность получения высокопрочных геополимерных материалов на основе бентонита и каолина (рис. 1) с различным соотношением SiO_2/Al_2O_3 . Массовое содержание минеральных компонентов в природном каолине: каолинит – 84%; кварц (Q) – 8%; альбит (A) – 3%; мусковит – 3%; анатаз (An) – 2%. Минеральный состав бентонита: монтмориллонит – 77%; каолинит – 1%; кварц – 15%; альбит – 5%; гематит (H) – 2%.

Процесс получения геополимеров включал две основные стадии: растворение термоактивированного (каолин 750°C, 2 ч; бентонит 850°C, 2 ч) алюмосиликатного прекурсора в щелочной среде (растворы NaOH 10М и натриевого жидкого стекла) и поликонденсацию образовавшихся в растворе олигомерных ионов.

¹НИИ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС, Санкт-Петербург, andre_alekseev_2017@mail.ru

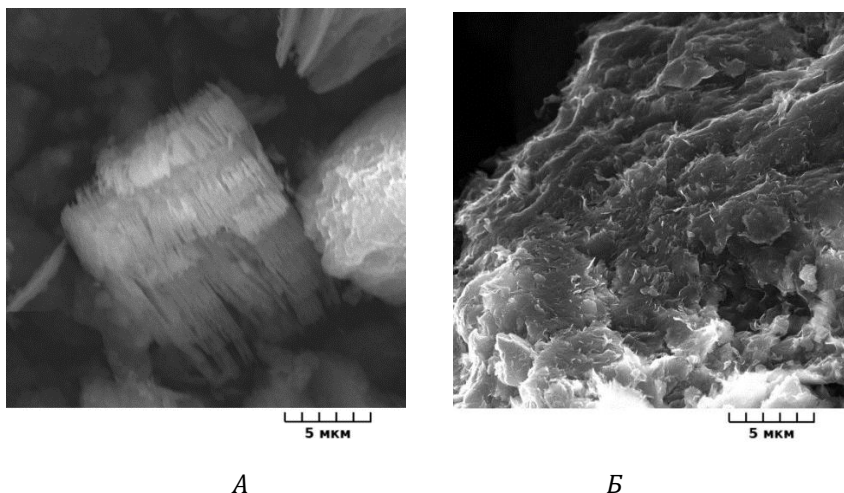


Рис. 1. СЭМ-изображения исходных глинистых минералов: (А) каолин (месторождение «Еленинское»), (Б) бентонит (месторождение «10-й Хутор»)

На рис. 2 приведены дифрактограммы синтезированных геополимеров с различным молярным соотношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (по данным EDX-анализа образцов). При щелочной активации каолина наблюдается формирование цеолитных фаз различной структуры. При $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=2.0$ формируется цеолит А, при $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=2.3$ наблюдается кристаллизация цеолита Y. Примеси анатаза и кварца, присутствующие в исходном метакеолине, сохраняются во всех образцах. Дальнейшее увеличение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ приводит к формированию только аморфной фазы с максимумом интенсивности в области $2\theta=28^\circ$.

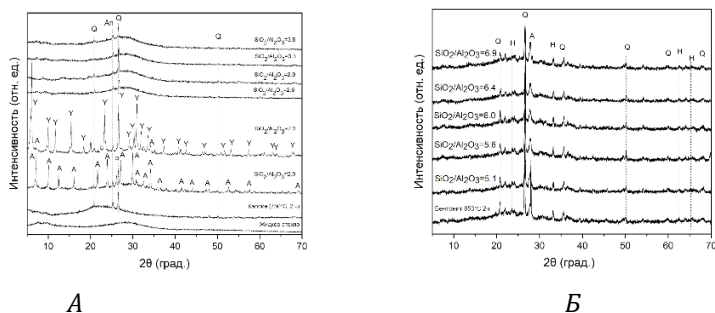


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы геополимеров с различным соотношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$: (А) – геополимеры на основе метакеолина; (Б) – геополимеры на основе метабентонита

Представленные данные демонстрируют формирование аморфной геополимерной фазы в образцах на основе метабентонита, что подтверждается наличием гало в диапазоне 2θ от 15° до 35° . Максимум интенсивности аморфного гало у геополимеров на основе метабентонита наблюдается на $2\theta=27^\circ$. Увеличение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ незначительно повышает интенсивность гало, указывая на возможное увеличение доли аморфной фазы. Результаты исследования механической прочности демонстрируют выраженную зависимость прочности геополимеров от молярного соотношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ для изученных прекурсоров (рис. 3). В случае метакеолина высокие значения прочности (67 МПа) достигаются при $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=2.9$. Для метабентонита максимум прочности (97 МПа) наблюдается при более высоких значениях $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (≥ 4.2).

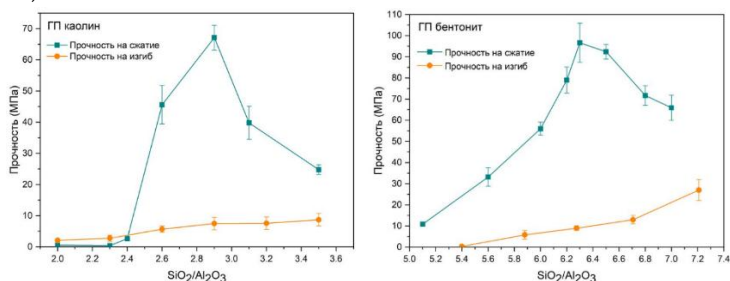


Рис. 3 Механическая прочность геополимеров на основе каолина и бентонита

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. 1. При различных значениях силикатного модуля в исследованных реакционных системах на основе метакеолина наблюдается кристаллизация цеолитных (NaA, NaY), что представляет интерес для получения объемных цеолитных материалов. 2. Наибольшей прочностью на сжатие характеризуются ретнгеноаморфные геополимерные фазы. Геополимеры на основе метабентонита обладают существенно большей механической прочностью (до 97 МПа), чем геополимеры на основе каолина.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00076, <https://rscf.ru/project/25-19-00076>.

Shahieh S., McKay G., Al-Ghamdi S. G. Comprehensive analysis of geopolymer materials: Properties, environmental impacts, and applications. Materials. 2023. 16. ID 7363. <http://dx.doi.org/10.3390/ma16237363>

Физико-химические принципы выбора глинистого сырья в технологии керамических пропантов

В.И. Верещагин¹, Т.В. Вакалова¹

В современной добыче трудноизвлекаемых нефти и газа широко применяется гидроразрыв пласта с использованием керамического гранулированного материала (пропантов), который предотвращает закрытие образовавшихся трещин и тем самым увеличивает скорость извлечения нефти. Основным критерием при выборе пропантов для тех или иных пластовых условий является их насыпная плотность и механическая прочность на сжатие, что позволяет сохранять трещину в открытом состоянии в течение длительного времени. Поэтому распространенной проблемой при развитии технологии керамического пропанта является сочетание таких антагонистических свойств гранулированного материала, как высокая прочность и низкая насыпная плотность.

По плотности и прочности современные пропанты делятся на легкие (абсолютная плотность $\leq 2,7$ г/см³, насыпная плотность $\leq 1,58$ г/см³) с рабочей прочностью 34–52 МПа, расклинивающие наполнители средней плотности (2,7–3,3 г/см³ и 1,58–1,78 г/см³, соответственно) с рабочей прочностью 52–70 МПа и тяжелыми расклинивающими ($\geq 3,3$ г/см³ и $\geq 1,78$ г/см³) с рабочей силой 85–100 МПа (Vakalova et al, 2019). Наибольшее распространение получили керамические расклинивающие материалы средней и высокой прочности (выдерживает давление сжатия 52–70 МПа и более) преимущественно глиноземистого или алюмосиликатного состава.

Известно, что механическая прочность керамики в первую очередь зависит от ее фазового состава — содержания кристаллической и стекловидной фаз, природа кристаллических фаз, условия их образования, габитус ее частиц также важны для формирования механических свойств керамики (Vakalova et al, 2021). В частности, если форма кристаллов будет вытянутой, то прочность увеличится за счет образования кристаллического каркаса. Если образование кристаллической фазы происходит с объемными изменениями (например, переход кварца в кристобалит), то это может привести к увеличению пористости и к снижению прочности. Механическая прочность керамики также зависит от степени ее спекания (плотности или пористости). Поэтому для повышения прочности гранулированного материала необходимо уменьшить его общую пористость и увеличить содержание кристаллической фазы. В настоящее время алюмосиликатные пропанты являются наиболее востребованными в нефтегазодобыче. Высококачественные каолины, бокситы и огнеупорные глины, а также

¹ НИ ТПУ, Томск, vver@tpu.ru

различные добавки природного и техногенного генезиса, интенсифицирующие процесс спекания и повышающие прочностные характеристики конечного продукта, являются традиционным природным сырьем для производства алюмосиликатных керамических пропантов средней плотности. Проведенные авторами исследования позволили выработать физико-химические параметры оценки выбора огнеупорного глинистого сырья для изготовления прочных алюмосиликатных пропантов, которыми являются: преимущественно каолинитовый состав с содержанием каолинита не менее 65 мас.%; содержание оксида Al_2O_3 в химическом составе в прокаленном состоянии не менее 35 мас.% (предпочтительно 40-45 мас.%); предельно допустимое содержание свободного кварца не более 15 мас.%; содержание щелочных и щелочно-земельных оксидов не более 1,2 мас.%, а также прочность на сжатие в спеченном состоянии не менее 70 МПа.

В то же время дефицит и постепенное истощение запасов высококачественных глин и каолина заставляют задуматься оприводят к перспективам использования для этой цели широко распространенных низкосортных глин, так называемых кирпичных глин. Эти глины представляют собой полиминеральное глинистое сырье преимущественно смектит-иллитового состава с примесями песка, железистых, карбонатных, полевошпатовых минералов и органических веществ. Вредными примесями являются грубые обломочные включения, особенно известняк и гипс. Такие глины широко используются для приготовления керамического кирпича, керамической черепицы, легких заполнителей, цемента и других.

Одним из недостатков легкоплавких глин, ограничивающих их использование в технологи керамических пропантов, является узкий интервал спекания, что обуславливает риск оплавления поверхности гранулированного материала из таких глин при их обжиге во вращающихся печах. Кроме того, относительно низкая прочность кальцинированных образцов из таких глин вызывает необходимость поиска прочностных добавок, механизм действия которых сводится к увеличению общего содержания в них кристаллической фазы и, соответственно, уменьшению содержания стеклофазы. Выявлено, что для повышения прочности гранулированного материала из легкоплавких глин целесообразно использование магматических пород в виде диабаз и гранитоидных пород. Установленное влияние используемых магматических пород позволило разработать составы и предложить технологическую схему получения алюмосиликатных пропантов на основе легкоплавких глин. При использовании гранитоидных и диабазовых пород в количестве 20-70% с легкоплавкими глинами получают легкие алюмосиликатные расклинивающие наполнители с насыпной плотностью 1,40-1,46 г/см³ в диапазоне температур 1050-1100 °С, способные выдерживать разрушающие давления до 34,5-52 МПа.

Vakalova T.V., Reshetova A.A., Revva I.B., Rusinov P.G., Balamygin D.I. Effect of thermochemical activation of clay raw materials on phase formation, microstructure and properties of aluminosilicate proppants, *Applied Clay Science*. 2019, 183, 105335 <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105335>

Vakalova T.V., Devyashina L.P., Sharafiev Sh.M., Sergeev N.P. Phase formation, structure and properties of light-weight aluminosilicate proppants based on clay-diabase and clay-granite binary mixes. *Ceramics International*. 2021, Volume 47, 11(1) 15282-15292. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.092>

Пробоподготовка песчаных горных пород. 2. Экстракция образцов

**Е.С. Деева¹, М.В. Шалдыбин¹, А.В. Канаки¹, А.Е. Алексеева¹,
И.В. Эфтор¹**

Глинистая фракция является важным компонентом любой обломочной породы (песчаник, алевролит и т.д.), где она обычно выполняет роль цемента или матрикса. Некоторые обломки в песчаниках, кроме того, могут представлять собой горные породы с глинистым основанием: сланцы, кутаны и пр. Содержание глинистой фракции в терригенных разностях пород может изменяться от долей процентов до 40-50%, при которых далее они уже представляют собой алевролиты и аргиллиты.

Традиционно при исследовании терригенных пород-коллекторов в нефтегазовом секторе изучению глинистых минералов уделяется большое внимание. Изучается раздельно валовый состав основных породообразующих минералов и отдельно выполняется анализ глинистой фракции с расшифровкой основных глинистых минералов: каолинит, хлорит и иллит, а также выявляется наличие набухающих глинистых фаз в виде смектита и смешаннослойных минералов. Однако трудностью для исследования является нефтенасыщенность песчаников, которая может оказывать влияние на качество выполняемого анализа. Для очищения обломочных пород от нефтепродуктов обычно выполняется экстракция разными методами с применением различных органических растворителей.

Для данного исследования были взяты три образца песчаных пород с целью выяснить как экстракция влияет на качество подготовки пробы и дифракционную картину. Были исследованы образцы с разной нефтенасыщенностью и составом углеводородов (УВ):

- Образец мелкозернистого песчаника (валанжин, Западная Сибирь) – насыщенный легкими УВ (конденсатом).
- Два образца среднезернистого песчаника (юрский комплекс, оксфорд, Западная Сибирь) - с разной степенью насыщения тяжелыми УВ (нефтью): насыщенный и сильнонасыщенный.

Минералогический состав образцов, оценка и сравнение дифрактограмм проведено на рентгеновском дифрактометре Rigaku Miniflex. Групповой состав хлороформенных экстрактов был осуществлен методом жидкостно-адсорбционной хроматографии на фракции, содержащие насыщенные, ароматические углеводороды и смолы. В качестве адсорбента использовался силикагель марки АСКГ с размером зерен 200-500 мкм.

¹АО «ТомскНИПИнефть», Томск, ShaldybinMV@tomsknpi.ru

Таблица 1. Групповой состав песчаников по данным пиролиза Rock-Eval, %

Образец	ТОС	Насыщенные УВ	Ароматические УВ	Смолы	Асфальтены
1	4.55	59,25	19.33	16,22	5,21
2	0.91	36,13	29.85	28,34	5,68
3	0.59	36,78	33,19	27,76	2,27

Для определения степени влияния нефтенасыщения на качество пробоподготовки и на качество полученной пробы были проведены параллельные исследования: валовый состав, подготовка глинистой суспензии и препарата исходной пробы и тот же набор исследований, но для образцов, прошедших процесс экстрагирования.

На этапе пробоподготовки при приготовлении суспензии исходные образцы с нефтенасыщением образовывали комки и сгустки, плохо перемешивались. При образовании суспензии наблюдалась повышенная гидрофобность, что негативно влияет на разделение частиц. После экстрагирования такие реакции наблюдались в меньшей степени (Рис. 1).



до экстрагирования



после экстрагирования

Рис. 1. Фотографии образцов при приготовлении суспензии для извлечения глинистой составляющей до и после экстрагирования

Сравнение дифракционных картин для образцов до и после экстрагирования показали разные результаты. Для образца, насыщенного конденсатом (№3) в пробоподготовке и в качестве дифрактограммы никаких различий не наблюдалось. Для образцов с нефтенасыщением (№1 и №2) различия отмечались в изменении общей интенсивности. Наибольшие различия в интенсивности наблюдаются для сильно нефтенасыщенного образца №1 (Рис. 2).

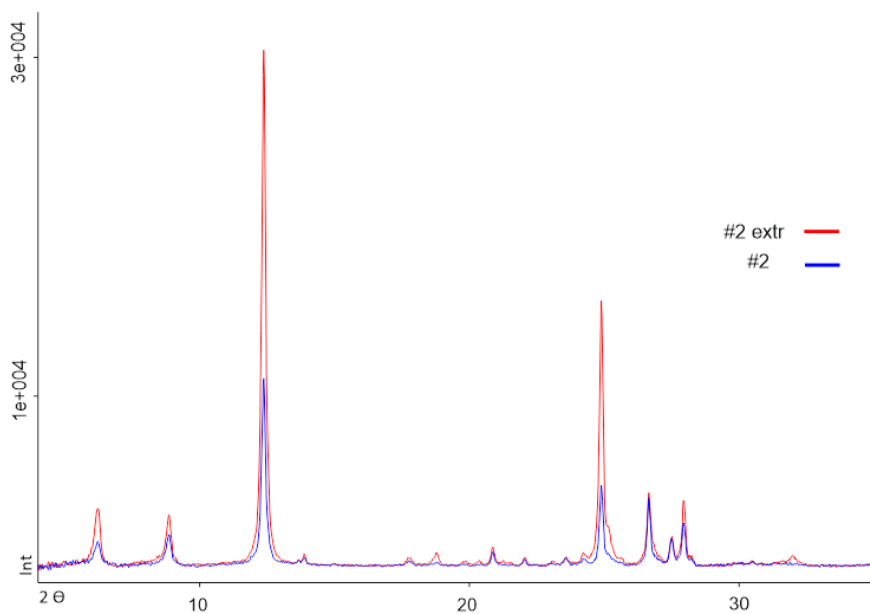


Рис. 2. Диаграммы до(синие) и после(красное) экстрагирования для образца №1

Подводя итоги по выполненному эксперименту, можно отметить и рекомендовать следующее.

Нефтенасыщение образцов оказывает влияние на этапе пробоподготовки, а именно на приготовление суспензии и обеспечения ее однородности для более качественного выделения глинистой фракции. Влияние насыщения отражается на получаемых дифрактограммах.

В случае если исследователь работает с нефтенасыщенными образцами, полезно выполнить оценку интенсивности насыщения УВ и при необходимости провести для образцов предварительное экстрагирование и очищение от УВ. При этом экстрагирование образцов разными методами не дает гарантию полного выхода всех имеющихся углеводородов в составе образца, особенно наиболее тяжелых фракций (смола и асфальтенов).

Рекомендуется выполнять предварительные экспериментальные исследования как насыщенных УВ, так и очищенных от них образцов чтобы сравнить данные и сформировать стратегию и подходы в работе и условия очистки: применяемый метод, длительность, состав и концентрацию очистителя и т.д.

Влияние добавок огнеупорной глины на свойства композиционного состава

П.В. Дякин¹, Ю.Е. Пивинский¹

Высококонцентрированные керамические суспензии (ВКВС) высокоглиноземистого состава нашли широкое применение в АО “Динур” в производстве формованных и неформованных огнеупоров, получаемых на основе ВКВС с преимущественным содержанием боксита как их матричной системы и различных огнеупорных заполнителей – боксита, электрокорунда, карбида кремния и их смесей. При этом значительную долю этой продукции занимают бетонные смеси для монолитной футеровки желобов доменных печей (желобные массы), меньшую – фасонные огнеупоры в виде гнездовых блоков, горелочных камней, изделий МКТП-85. В зависимости от вида огнеупоров и метода формования в формовочных смесях для их получения содержание матричной системы (ВКВС) находится в пределах 25–35 % (по сухой массе). Для пластификации в состав формовочных смесей вводят добавки высокодисперсной огнеупорной глины от 1 до 2 % (вибролитые массы, статическое прессование), до 3 % (вибротрамбующие набивные массы). Огнеупорные глины входят в состав матричных систем керамобетонов и их содержание в последних в зависимости от метода формования может колебаться в пределах 3–10 %. В настоящей работе поставлена задача оптимизации содержания добавок огнеупорной глины и изучение их влияния на различные свойства как матричной системы, так и керамобетонов на основе ВКВС высокоглиноземистого состава. В отличие от ВКВС как искусственных керамических вяжущих (ИКВ), глины – природные керамические вяжущие (ПКВ). При сопоставлении глины и ВКВС сделан вывод о том, что вяжущие свойства глины определяются не только их минеральным составом, но прежде всего содержанием в них сверхтонких (коллоидных) частиц. Показатели прочности и пористости полуфабриката на основе разнообразных глинистых материалов, как и в случае ВКВС, определяются содержанием в них фракций коллоидной дисперсности (менее 0,5 мкм).

Исходные материалы. В качестве базовой ВКВС в системе боксит – ВДКС была использована суспензия, полученная на основе китайского бокситового шамота марки Rota HD, содержащего 88,5 % Al_2O_3 , 5 % SiO_2 , 3,69 % TiO_2 , 1,32 % Fe_2O_3 и 0,55 % щелочных и щелочноземельных оксидов (R_2O , CaO , MgO). Фазовый состав боксита характеризовался содержанием 82 % корунда, 10–11 % муллита, 5–6 % соединений титана и 2–4 % стеклофазы. В качестве второго компонента твердой фазы ВКВС использовали предварительно полученную мокрым измельчением высокодисперсную суспензию плавленого кварца (SiO_2

¹ ООО НВФ «Керамбет-Огнеупор», Санкт-Петербург, dyakin@mail.ru

- 98,9 %, Al_2O_3 – 0,7 %), которая в количестве 11 % (по сухому) вводилась в состав мелющей загрузки для совместного мокрого измельчения. Вследствие эффекта селективного измельчения плавленый кварц в ВКВС композиционного состава представлен в виде высокодисперсных частиц – ВДКС. Твердая фаза ВКВС характеризовалась содержанием Al_2O_3 – 79 % и SiO_2 – 15,3 % и характеризовалась плотностью 2,75 г/см³, содержанием частиц d_m = 9.0 мкм и достаточно высоким (19,5 %) частиц ситового размера – 40–100 мкм, из них 7 % - выше 63 мкм. В качестве пластифицирующей добавки в состав ВКВС указанного состава вводили высокопластичную и высокодисперсную огнеупорную нижеуфельскую глину НУ, которая характеризовалась содержанием Al_2O_3 – 31 %, SiO_2 – 52 %, Fe_2O_3 – 3 % и потерями при прокаливании – 12,1 %. Содержание Al_2O_3 и SiO_2 на прокаленное вещество при этом составляет 34,7 и 58,2 % соответственно. С учетом молярного соотношения оксидов для муллита 2,55 ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$) реальный выход муллита для данной глины составит около 45–50 %. Нижеуфельская глина, характеризующаяся огнеупорностью 1670–1690 °С по принятой классификации относится к огнеупорной, а по содержанию оксидов $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ – к основной. Известно, что нижеуфельская глина характеризуется достаточно высоким (до 80 %) содержанием частиц менее 1 мкм и при этом значительная их доля имеет размерность наночастиц (менее 0,1 мкм). Глины этого типа характеризуются температурой спекания 1180–1300 °С. В состав исходных ВКВС добавки глины в количестве от 1 до 10 % (по сухому) вводились в виде предварительно полученной глиняной пасты с влажностью 35 %. В зависимости от процентного показателя добавки глины содержание основных оксидов в конечной пластифицированной ВКВС изменялось в пределах – 74–79 % для Al_2O_3 и 15–19 % для SiO_2 . При максимальном (10 %) количестве добавки глины содержание Al_2O_3 понижалось по сравнению с исходным до 74 %, а содержание SiO_2 повышалось до 19 %. Вследствие этого существенно уменьшается кремнеземистый модуль. Для ВКВС с максимальным (10 %) содержанием глины значение истинной плотности твердой фазы понижается с 3,45 (исходная) до 3,32 г/см³. Условная вязкость при этом понижается в пределах 14–3,5 градуса Энглера. На основе смешанных ВКВС указанного композиционного состава методом шликерного литья в гипсовых формах формовали образцы в виде балочек с размером 10x10x80 мм. Продолжительность набора массы – 20–30 мин. Как следует из данных, содержание добавок глины оказывает существенное влияние на показатели кажущейся пористости отливки после сушки. Введение 10 % глины приводит к росту P_k от 16,5 % для исходной ВКВС до 26,5 %. Аналогичные значения кажущейся плотности при этом понижаются с 2,88 до 2,43 г/см³, существенное повышение пористости отливок наблюдается при увеличении добавки глины выше 2,5 %.

Приведены примеры эффективности добавок Нижнеувельской глины в технологии ВКВС и керамобетонов. Изучены свойства отливок, полученных методом шликерного литья на основе ВКВС композиционного состава в системе боксит-высокодисперсное кварцевое стекло (ВДКС) и добавок огнеупорной глины (в пределах 1–10 %). При помощи высокотемпературного дилатометра изучено влияние непрерывного неизотермического нагрева до температуры 1500 °С на показатели изменения линейных размеров образцов. Полученные при этом данные сопоставлены с показателями кажущейся пористости образцов после их изотермического обжига с выдержкой 1 час в интервале температур 800–1500 °С. Максимальные значения линейной усадки при неизотермическом нагреве и минимальные значения кажущейся пористости после изотермического обжига соответствуют интервалу температур 1200–1250 °С. При температуре 1500 °С отмечаются максимальные показатели как роста образцов, так и их пористости, что обусловлено протеканием процесса вторичного муллитообразования. На рис. 1 представлен электронный снимок муллита игольчатой формы в матричной системе на основе ВКВС боксита с 10 % глины при $T_{\text{обж}} = 1400$ °С.

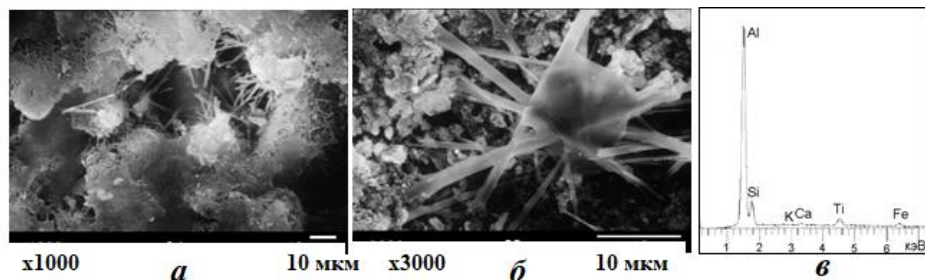


Рис. 1. Электронные снимки муллита игольчатой формы, образованного в матричной системе после обжига при 1400 °С

Пробоподготовка песчаных горных пород. 1. Размол образцов

А.В. Канаки¹, Е.С. Деева¹, М.В. Шалдыбин¹, А.Е. Алексеева¹

Пробоподготовка для выполнения рентгеноструктурного анализа минералов и горных пород является одной из самых важных частей и включает в себя ряд этапов, направленных на получение представительной и пригодной пробы. Основная цель - подготовить образец так, чтобы его состав соответствовал исходному каменному материалу (обеспечить гомогенность и представительность минеральных фаз) и был пригоден для проведения анализа - соблюден размер зерен и заполнение кюветы порошковым агрегатом.

Для определения степени влияния размла (размерность зерен) на качество подготовки пробы и на качество полученной съемки и как следствие на качество расшифровки (качественное и количественное соотношение минеральных фаз) были проведены эксперименты по размолу с увеличением времени размла. Для исследования были взяты два образца песчаных пород. Каждый образец, предварительно раскрошенный в щековой дробилке, хорошо перемешивался и делился на две части и далее подвергался размолу на мельницах XRD-Mill McCrone (агатовые размольные компоненты) и Pulverisette-5 (размольные шары и ступка из карбида вольфрама). Размол каждой пробы проводился от 1 до 14 минут (с интервалом в 2 минуты). Дополнительно в качестве эксперимента был проведен размол на 20, 30 и 40 минутах.

Анализ полученных дифракционных картин показал, что дробление до 6 минут вне зависимости от оборудования приводит к сдвигу дифракционных отражений, а также к проявлению сильной ориентации для полевых шпатов (рис. 1), также отмечены различия в интенсивностях.

Наименьшие различия в качестве дифракционных картин и соотношения минералов отмечены для времени размла в диапазоне 8-12 минут, которое является оптимальным для песчаников. С увеличением времени размла отмечена тенденция к уменьшению размеров кристаллитов, четкости разделения пиков и уменьшения интенсивности пиков глинистых минералов, вплоть до их почти полного исчезновения (рис. 2), особенно при дроблении с использованием размольных шаров из карбида вольфрама. Предположительно это связывается с более «жестким» истиранием пробы металлическими компонентами и нагреванием пробы при дроблении. Данные гранулометрического анализа подтвердили, что с увеличением времени размла происходит увеличение алевритовой (0,05-0,005

¹ АО «ТомскНИПИнефть», Томск, shaldybinMV@tomsknpi.ru

мм) и пелитовой (<0,005 мм) фракции (таблица 1). Таким образом сильно длительный размол фактически переводит часть не глинистых компонентов в тонкую пелитовую фракцию. Для песчаников самого крепкого состава он не должен быть более 15 минут.

Таблица 1 – Гранулометрический состав песчаников после размола 12 и 40 минут

образец	время, мин	песчаные (1,40-0,05) мм	алевритовые (0,050-0,005) мм	пелитовые (<0,005) мм
1	12	19.0	45.9	35.2
	40	1.6	52.6	45.8
2	12	10.5	59.6	30.0
	40	2.4	67.6	30.0

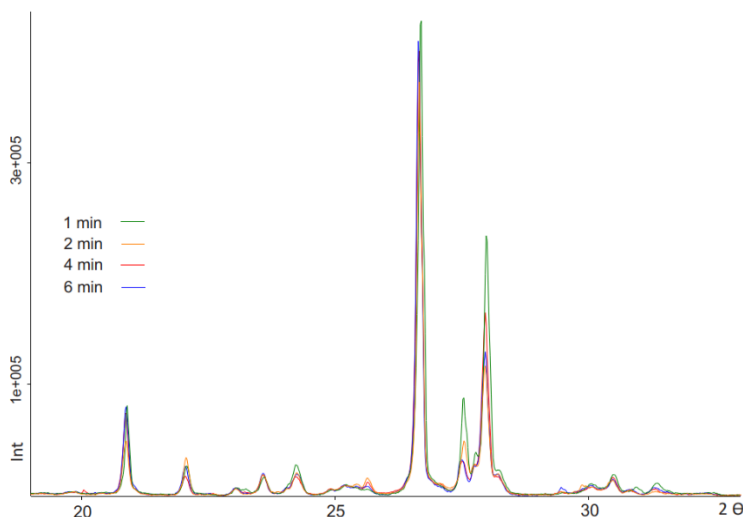


Рис. 1. Часть области съемки образцов с разным временем размола (от 1 до 6 минут) на мельнице XRD-Mill

Подводя итоги эксперимента, можно отметить влияние малого времени (менее 6 минут) размола на качество полученных дифрактограмм, а также влияние слишком большого времени размола (более 14 минут). Также при сравнении рентгенограмм образцов, раздробленных на разном оборудовании с принципиально разным способом дробления, отмечено, что использование агатовых компонентов и отсутствие нагрева при размоле является более щадящим способом дробления. Размольная гарнитура на металлической основе менее эффективна.

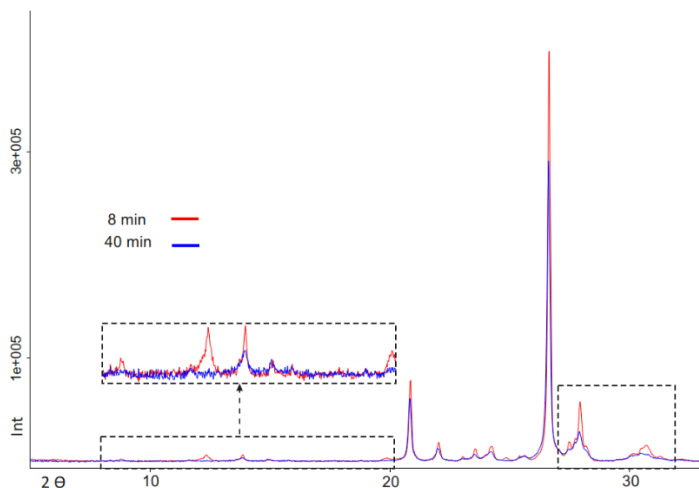


Рис. 2. Часть области съемки образцов с временем размола 8 и 40 минуты на мельнице Pulverisette-5

Следует заметить, что вывод по времени размола был сделан для песчаных пород, которые традиционно содержат много твердых компонентов – кварц (7 по шкале Мооса) и полевых шпатов (6). Очевидно, что для других пород, например, мягких карбонатов время помола должно быть меньше. Однако любой помол — это набор и ряд технологических параметров таких как состав размольной гарнитуры, количество шаров, объем ступки, размер размалываемой фракции после щековой дробилки, количество заданных оборотов мельницы, содержание влаги и УВ, внешние условия среды. И наконец, опыт и квалификация исполнителя размола также имеет значение.

В независимости от полученных в данном исследовании результатов выбор оборудования и время размола необходимо подбирать экспериментальным путем для каждой размольной мельницы и для каждого типа горных пород или других материалов.

Исследование галопелитовых прослоев продуктивной толщи Верхнекамского месторождения

А.М. Лебедева^{1,2}, А.И. Рысин², Н.А. Румянцева²

Ввиду специфики осадконакопления в период формирования Верхнекамского калийного месторождения геологические условия его юго-восточных участков осложнены содержанием галопелитов. Они представляют собой глинистые и мергелистые породы, содержащие до 20–30 % легкорастворимых солей, а также нерастворимый остаток – ангидрит, карбонаты, органическое вещество и пр. Определены несколько основных типов распространения галопелитов в толще: внутрикристаллические примеси, вкрапления, тонкие пленки, обрамляющие кристаллы, небольшие линзы. Однако наиболее значимым с точки зрения влияния на прочностные и деформационные параметры породы являются тонкие выдержанные галопелитовые прослои по напластованию соляных отложений, которые в некоторых случаях на отдельных участках разреза укрупняются, формируя пласты мощностью до 1,0–1,5 метров.

Исследования проведены на ненарушенных и модельных образцах, представляющих собой собранные в цилиндр диски сильвинита, каменной соли и галопелита (рис. 1). Пределы прочности обеих групп имеют близкие значения, при этом модельные образцы демонстрируют большую пластичность.



Рис. 1. Внешний вид испытательных образцов

Также установлено, что на прочностные характеристики соляной породы влияют текстурные проявления самих галопелитов – тончайшие соляные прослойки, их количество и закономерность расположения. Значения предела прочности образцов условно чистого галопелита также колеблются в

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, amlebedeva07@gmail.com

² ООО «ПроТех Инжиниринг», Москва, aleksandr.rysin@pte.eurochem.ru

зависимости от состава глинистого прослоя. Образцы с визуально однородной глиной демонстрируют меньший предел прочности в сравнении с образцами, имеющими значительное количество галитовых включений. Диапазон значений прочности составляет 0,69–4,13 МПа, что на порядок меньше прочностей каменной соли и сильвинита.

По результатам комплекса испытаний построена диаграмма предела прочности в относительных единицах измерения от содержания нерастворимого остатка в образце. Установлено, что при содержании до 3 % четкой зависимости не прослеживается – выделенная область характеризуется облаком точек. Однако при превышении 3 % наблюдается резкое падение параметра по степенному закону. При этом образцы с множественными тонкими прослоями демонстрируют более значительное снижение прочности, чем при наличии единичных мощных включений.

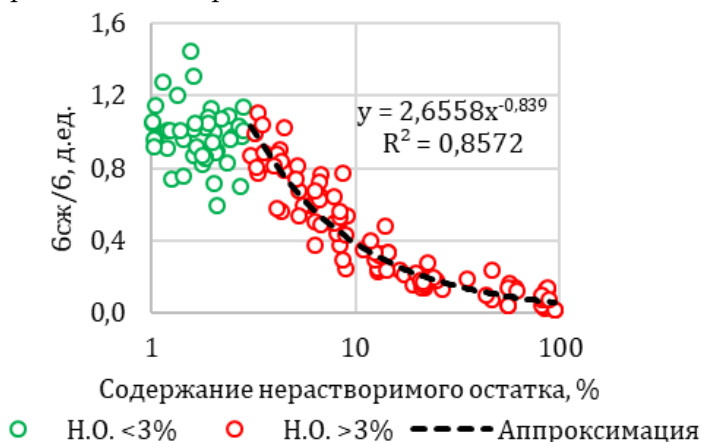


Рис. 2. Диаграмма предела прочности от содержания нерастворимого остатка

Раевский М.П., Фивег М.А., Герасимова В.В. Месторождения калийных солей СССР. Методы их поисков и разведки. Л. «Недра». 1973, 344 с.

Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. Премь: ГИ УрО РАН, 2001. 429 с.

Каблинов О.С., Чайковский И.И. О влиянии формы выделения глинистого материала на прочность каменной соли. Горное эхо. 2021. № 2 (83). С. 3-6.

Природные наноконтейнеры на основе галлуазита для создания микроудобрений

**П.Н. Максимов¹, Н.А. Максимова¹, П.А. Косцова¹,
С.С. Повилайнен¹**

Современное сельское хозяйство сталкивается с необходимостью повышения эффективности удобрений с высокой экологической чистотой. Одним из перспективных направлений в повестке усовершенствования агротехнологий является использование комплексных материалов в роли "умных" контейнеров для контролируемой доставки питательных веществ растениям (Calabi-Floody et al., 2018). К подобным материалам относятся некоторые природные минералы.

Галлуазит ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) – глинистый минерал группы каолинита, отличающийся слоистой структурой. Особый интерес представляет его нанотрубчатая модификация (HNT), которая обладает уникальной поллой структурой (Joussein et al., 2005; Yuan et al., 2015). В материаловедении он используется как наполнитель в композитах и керамике для повышения механической прочности и термостойкости (Lampropoulou, 2021; Shchukin et al., 2005). Эти же преимущества делают галлуазит перспективным материалом для агрохимии. Благодаря поллой структуре и способности менять заряд внутренней и внешней поверхности (Wang et al., 2020), он может выступать в роли наноконтейнера для микроэлементов (цинк, медь, марганец и др.), обеспечивая их постепенное высвобождение и защиту от преждевременного вымывания из почвы (Dasi et al., 2025; Maximov et al., 2023).

В данном исследовании рассматриваются возможности применения галлуазитовых нанотрубок (Галлуазит-Урал) для создания инновационных удобрений с контролируемой кинетикой высвобождения микроэлементов. Особое внимание уделено разработке метода загрузки нутриентами, основанного на управлении поверхностного заряда нанотрубок через изменение pH-среды. Экспериментально установлена зависимость эффективности загрузки от кислотно-щелочных характеристик среды, что открывает возможности для контролируемого введения микронутриентов в структуру галлуазита (Wang et al., 2020).

В данной работе исследовались композиты, модифицированные марганцем и молибденом в близ-нейтральных ($\text{pH} \approx 6$) и щелочных условиях ($\text{pH} \approx 8$). Для комплексной оценки состояния и свойств образцов использовались методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), анализа удельной поверхности по методу БЭТ, инфракрасной спектроскопии (ИК), рентгендифракционного анализа (РДА) и просвечивающей

¹НИ ТПУ, Томск, maximov_pn@mail.ru

электронной микроскопии (ПЭМ). Модификация галлуазита марганцем и молибденом проводилась как в дистиллированной воде, так и в щелочном растворе. При модификации молибденом галлуазит предварительно выдерживался в щелочной среде в течение 30 минут, после чего в раствор вносился молибдат аммония в концентрациях 2, 4 и 8 мол.%. Полученные суспензии периодически перемешивались в течение 6 часов, после чего твёрдую фазу отделяли и высушивали при комнатной температуре.

СЭМ-анализ показал, что обработка галлуазита нашатырным спиртом не приводит к структурным нарушениям нанотрубок (рис. 1), несмотря на известную склонность галлуазита к деградации в щелочной среде (Атякшева & Касьянов, 2021). Отдельные частицы соединений марганца и молибдена не обнаружены, что может свидетельствовать о высокой сорбционной способности нанотрубок и/или о том, что предельная концентрация вносимого микроэлемента не была достигнута. В то же время, в опытах с нейтральной средой, а именно при активации галлуазита перманганатом калия в дистиллированной воде, наблюдалось значительное количество осаждённых соединений марганца, в отличие от условий щелочной обработки, где таких агрегаций не фиксировалось. Следует отметить, что вблизи нейтральных значений pH (≈ 6) заряд внутренней поверхности галлуазита остаётся положительным, тогда как в слабощелочной среде (≈ 8) он меняется на отрицательный (Wang et al., 2020). В таких условиях катионообменные свойства нанотрубок проявляются более эффективно по отношению к положительно заряженным ионам микроэлементов, что согласуется с наблюдаемыми различиями в распределении соединений марганца.

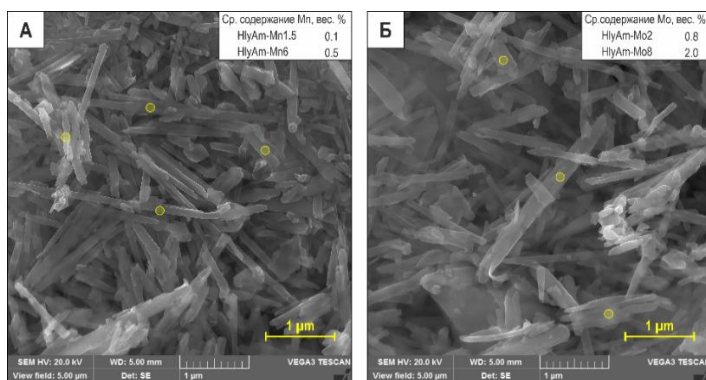


Рис. 1. СЭМ-изображения модифицированного галлуазита: (А) Мп-галлуазит и (Б) Мо-галлуазит. Желтыми точками отмечены области локального энергодисперсионного микроанализа (ЭДС)

Результаты БЭТ-анализа показали, что исходная удельная поверхность галлуазита составляет 20,8 м²/г. При низких концентрациях микроэлементов она увеличивается незначительно ($\approx 0,6$ м²/г относительно исходного значения), вероятно, вследствие удаления органических примесей из порового пространства. Однако при максимальной концентрации молибдена удельная поверхность снижается до 17 м²/г, что, по-видимому, связано с частичной блокировкой пор молибдатными комплексами.

Проведённые исследования показали, что галлуазитовые нанотрубки сохраняют высокую структурную стабильность при щелочной обработке, что подтверждает их перспективность для разработки удобрений с контролируемым высвобождением микроэлементов. Регулирование заряда поверхности галлуазита за счёт изменения pH обеспечивает эффективное управление сорбцией марганца и молибдена. Отсутствие осаждённых фаз при выбранных условиях модификации указывает на возможность достижения равномерного распределения микроэлементов в микропорах нанотрубок. Изменения удельной поверхности галлуазита при модификации зависят от концентрации компонентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-27-00311).

Атякшева, Л. Ф., & Касьянов, И. А. (2021). Галлуазит – природные алюмосиликатные нанотрубки: структурные особенности и адсорбционные свойства. *Современные Молекулярные Сита*, 3(2), 124–143.

Calabi-Floody, M., Medina, J., Rumpel, C., Condron, L. M., Hernandez, M., Dumont, M., Mora, M. de la. (2018). Smart Fertilizers as a Strategy for Sustainable Agriculture, 119–157.

Dasi, E., Khitrin, I., Ruban, A., Maximov, P., Maximova, N., Yuan, P., & Rudmin, M. (2025). Targeted micronutrient nanofertilizers of injectable actions based on Cu/B/I halloysite nanotube composites. *Microporous and Mesoporous Materials*, 394, 113663.

Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., & Delvaux, B. (2005). Halloysite clay minerals – a review. *Clay Minerals*, 40(4), 383–426.

Maximov, P., Dasi, E., Kalinina, N., Ruban, A., Pokidko, B., & Rudmin, M. (2023). Zinc-Intercalated Halloysite Nanotubes as Potential Nanocomposite Fertilizers with Targeted Delivery of Micronutrients. *Materials*, 16(20), 6729.

Shchukin, D. G., Sukhorukov, G. B., Price, R. R., & Lvov, Y. M. (2005). Halloysite nanotubes as biomimetic nanoreactors. *Small*, 1(5), 510–513.

Lampropoulou, P., & Papoulis, D. (2021). Halloysite in different ceramic products: A review. In *Materials* (Vol. 14, Issue 19). MDPI.

Wang, C., He, Z., Liu, Y., Zhou, C., Jiao, J., Li, P., Sun, D., Lin, L., & Yang, Z. (2020). Chitosan-modified halloysite nanotubes as a controlled-release nanocarrier for nitrogen delivery. *Applied Clay Science*, 198.

Yuan, P., Tan, D., & Annabi-Bergaya, F. (2015). Properties and applications of halloysite nanotubes: recent research advances and future prospects.

Исследование влияния структуры каолинов на их технологические свойства

**А.А. Нестеренко¹, И.А. Павлова², Т.А. Королева¹,
В.В. Крупская¹**

Каолиниты – 1:1 слоистые алюмосиликаты, которые широко применяются в различных отраслях промышленности, включая керамическую, бумажную, лакокрасочную, косметическую, фармацевтическую и не только. При этом известно, что особенности состава глин и степень кристалличности каолинита в значительной степени сказывается на свойствах пород и определяет области использования (Bergaya, 2013). Ввиду высокой востребованности каолинов, особую актуальность приобретают исследования влияния структуры каолинитов на технологические свойства глин.

Каолины являются обязательным компонентом фарфоровых и глазурных масс. Они обеспечивают реологические свойства массы при получении изделий методом шликерного литья, а также белизну и муллитизацию керамики после обжига. Одним из основных показателей керамического шликера является его текучесть, которая обеспечивает качественный набор массы на стенках гипсовой формы. Загустевание шликера в гипсовой форме является негативным свойством, в результате которого шликер невозможно слить из формы сохранив целостность изделия. Самые качественные литейные шликеры получают на основе просьяновского и глуховецкого каолинов. В настоящее время поставки данных каолинов весьма затруднены. В связи с этим керамические предприятия находятся в поиске качественных каолинов.

В данной работе для проведения исследований были выбраны чистые каолиновые глины различных месторождений: Глуховецкое (Украина), Рафсанджан (Иран), Кыштым (Россия), Просьяновское (Украина), также был исследован промышленный образец каолина КБЧ-1 месторождения Чекмакульское (Россия). Образцы исследовались комплексом методов, включающим рентгенодифракционный анализ для изучения минерального состава и структурных особенностей (оценка степени кристалличности), инфракрасную спектроскопию средней области для выявления присутствия изоморфных замещений в структуре и термогравиметрический анализ для изучения температурной устойчивости каолинита. Текучесть каолиновых шликеров изучали по времени истечения 100 см³ шликера с относительной влажностью 50 % при использовании в качестве электролита силиката натрия. Оптимальную концентрацию подбирали опытным путем, принимая за

¹ ИГЕМ РАН, Москва, 555stasy@bk.ru

² УрФУ, Екатеринбург, htoko@yandex.ru

результат минимальное время истечения шликера. Коэффициент загустевания рассчитывали, как отношение времени истечения шликера после выстаивания 30 мин к времени истечения шликера после выстаивания 30 с.

Структура каолинита характеризуется различной степенью упорядоченности. Степень упорядоченности – это относительная мера нарушения строгой периодичности его структуры, вызванная дефектами внутреннего строения отдельных слоёв и неупорядоченностью их взаимного расположения (Aparicio, 2006).

По результатам исследования различных каолинов наблюдается уменьшение степени кристалличности AGFI (Aparicio, 2006) в следующем ряду: КФН-2 (1.65) → КН-83 (1.64) → КС-1 (1.59) → КБЧ-1 (1.39) → ХК (1.30) → 4-КО (0.99) → К-Раф (0.95) (рис. 1).

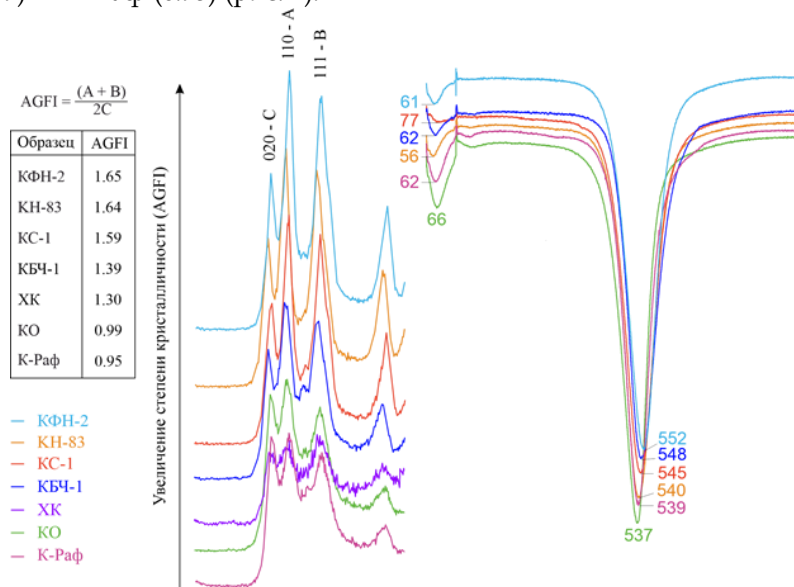


Рис. 1. Зависимость увеличения температуры дегидроксидации с увеличением степени упорядоченности каолинита

По данным ИК спектроскопии в образцах КБЧ-1 и К-Раф было выявлено присутствие изоморфных замещений железа в структуре каолинита по полосам 3598 и 878 см^{-1} .

Каолиновые шликеры на основе каолинов КФН-2, КН-83, КС-1 стабильны по текучести и практически не загустевают при выстаивании, коэффициент загустевания составляет значения 1–1.04. Время истечения 100 см^3 шликера с влажностью 50 % составляет порядка 4–5 с. Тогда как шликер на основе каолина КБЧ-1 загустевает и характеризуется коэффициентом

загустевания 1.34, время истечения данного шликера составляет 9 с. Шликер на основе каолина КО загустевает настолько сильно, что перестает вытекать из вискозиметра.

Результаты проведенных исследований позволили выявить основные характеристики строения каолинита различных месторождений и их определяющее влияние на свойства глин, проследить закономерность увеличения температуры дегидроксиляции с увеличением степени упорядоченности каолинита, при этом появление изоморфного железа не сказывается на изменении рассмотренных параметров. Предварительно прослеживается зависимости реологических свойств каолиновых шликеров от степени кристалличности каолинитов, слагающих каолины. Низкоупорядоченные каолиниты склонны к загустеванию, тогда как высокоупорядоченные – практически не загустевают.

Bergaya F., Lagaly G. Handbook of clay science. 2nd Edition. Elsevier. 2013, 5. ISBN: 9780080993713.

Aparicio P., Galán E., Ferrell R. E. A new kaolinite order index based on XRD profile fitting. Clay Minerals. 2006, 41 (4), 811–817.

Влияние степени упорядоченности структуры каолинитов на литейные свойства каолиновых шликеров

**И. А. Павлова¹, Д.И. Ащеулов¹, З.А. Жуйкова¹,
Е.П. Фарафонтова¹**

О степень упорядоченности каолинитов и расчет содержания высокоупорядоченного и низко-упорядоченного каолинита в каолинах приведены в работах Б.А. Сахарова и др. (Sakharov, 2022, 2016). Упорядоченность структуры каолинитов влияет на технологические свойства керамических масс на основе каолинов. В работе приведены данные по определению текучести каолиновых шликеров в зависимости от степени упорядоченности каолинитов в каолинах. В работе использовали каолины месторождения Журавлиный Лог (Челябинская обл.) сорта 1 и сорта 1А. Химический состав каолинов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав каолинов

Оксид	Содержание, мас. %	
	ЖЛ1	ЖЛ1А
Al ₂ O ₃	37.43	34.58
SiO ₂	47.65	49.27
Na ₂ O	0.02	0.11
K ₂ O	0.96	3.52
MgO	0.20	0.24
CaO	0	0
Fe ₂ O ₃	0.74	0.78
TiO ₂	0.17	0.203
MnO	0.01	0.007
Δm _{прк}	12.80	11.25

Минеральный состав каолинов приведен в табл. 2. Каолин ЖЛ1 содержит большее количество высокоупорядоченного каолинита и характеризуется большим индексом кристалличности Хинкли, в сравнении с каолином ЖЛ1А (табл. 2).

Таблица 2. Минеральный состав каолинов

Фаза	Каолин	
	ЖЛ1	ЖЛ1А
Каолинит	85	71
Кварц	До 3	До 2
Иллит	7	13

¹ УрФУ, Екатеринбург, htko@yandex.ru

Мусковит	До 2	До 2
Микроклин	До 1	7
Хлорит	До 2	До 2
Смектит	-	До 3

Таблица 3. Индекс Хинкли и соотношение высоко- и низко-упорядоченных каолинитов

Каолин	Индекс Хинкли	ВУК	НУК
ЖЛ1	1.06	41.7	58.3
ЖЛ1А	0.84	31.0	69.0

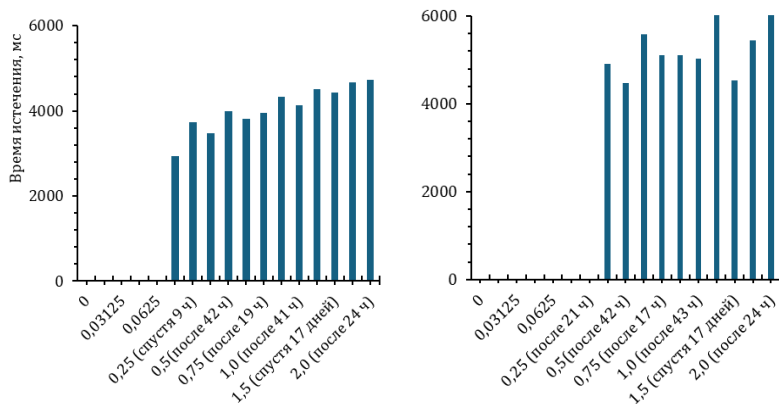


Рис. 1. Зависимость текучести шликера ЖЛ1 (А) и ЖЛ1А (Б) от концентрации электролита

Текучесть каолинового шликера, содержащего большее количество высокоупорядоченного каолинита (ЖЛ1), более стабильна в зависимости от концентрации и времени выстаивания шликера в сравнении со шликером на основе каолина ЖЛ1А, содержащего меньшее количество низко-упорядоченного каолинита (рис. 1).

B. A. Sakharov, Structure and phase heterogeneity of natural kaolinities, Collection of materials of the VII Russian Conference on Clays and Clay Minerals "CLAYS-2022" and the V Russian School on Clay Minerals «Argilla Studium-2022» [in Russian] (2022) 20–24. ISBN 978-5-88918-068-5.

B. A. Sakharov, V. A. Drits, D. K. McCarty et al, Modeling powder X-ray diffraction patterns of the clay minerals society kaolinite standards: KGa-1, KGa-1b, and KGa-2, Clays Clay Miner. 64 (2016) 314–333. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2016.0640307>.

Зависимость прочности при одноосном сжатии компактированных бентонитовых глин от времени выдержки

М.О. Рощин¹, В.П. Шашкин¹, В.Б. Комаров¹, С.В. Закусин¹

Глины и глинистые материалы широко используются в различных отраслях народного хозяйства. Для оценки перспективности использования глинистых материалов при разработке и создании различного типа инженерных барьеров безопасности, путём прессования были скомпактированы цилиндры из бентонитовой глины размером 25х50 мм, плотностью скелета 1,7 г/см³ и влажностью 21%.

Предел прочности при одноосном сжатии – один из наиболее важных показателей, характеризующих способность инженерных барьеров безопасности сохранять целостность под действием механических нагрузок (Крупская и др., 2023). В свою очередь, она в существенной мере зависит от минерального состава, плотности, влажности и времени выдержки компактированного образца.

Объектами исследования послужили образцы бентонитовой глины м-я 10-й Хутор (республика Хакасия) со следующими интервалами выдержки: 0, 1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 50 и 64 суток.

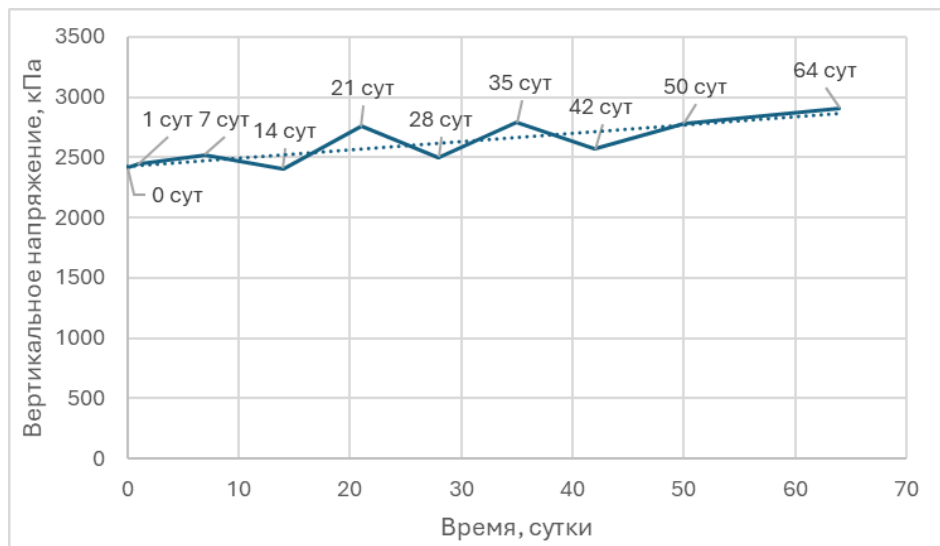


Рис. 1. График зависимости прочности от времени выдержки

¹ ИГЕМ РАН, Москва, roshchin2m8@gmail.ru



Рис. 2. Фотографии образцов после разрушения

Результаты проведённых исследований по определению предела прочности при одноосном сжатии компактированных бентонитов с различным временем выдержки показывают, что в диапазоне от 0 до 64 суток происходит упрочнение (рис. 1), связанное, по всей видимости с формированием более равномерно распределённых в объёме образца контактов между частицами.

Крупская В. В., Тюпина Е. А., Закусин С. В., Ильина О. А., Савельева Е. А. Обоснование выбора глинистых материалов для разработки инженерных барьеров безопасности при изоляции РАО в ПГЗРО на участке недр «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 98—112. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-98-112.

Комплексные минеральные нанокompозиты на основе глауконита Кирдинского месторождения (Mg, S, N): опыт создания и характеристика

И.С. Хитрин¹, М.А. Рудмин¹

Общество сталкивается с проблемами, которые являются следствием увеличения численности населения. Потребность в удовлетворении растущего спроса на продукты питания, а также необходимость сохранения экологии окружающей среды вынуждают поиск щадящих, но вместе с тем эффективных способов воздействия на почву (Matson, 1997; Rudmin et al., 2022). Традиционные удобрения при своей эффективности, могут нанести существенный ущерб природе. В качестве более оптимального решения поставленной задачи рассматривается переход агроиндустрии на экологичные удобрения пролонгированного действия. То есть нанокompозиты, обеспечивающие направленное, контролируемое высвобождение питательных элементов в почву (Rudmin et al., 2022). Такими элементами в том числе являются магний, азот и сера. Они увеличивают устойчивость к экологическим и биологическим стрессам и способствуют ускорению развития и роста растений. Для создания и улучшения качества удобрений адресного действия тестируются слоистые и реже каркасные минералы, а также полимерные и органические вещества (Borges et al., 2017). Среди филлосиликатов в рамках создания удобрений контролируемого действия исследуются смектиты, каолинит, галлуазит и в особенности глауконит (Рудмин и др., 2021; Хитрин и Рудмин, 2023)

Целью данной работы является изучение сорбции микронутриентов (Mg, N, S) в разноуровневых порах глауконита Кирдинского месторождения по средствам активации минерала в растворах для создания эко-безопасных и эффективных нанокompозитных веществ пролонгированного действия.

В работе использовался глауконит Кирдинского месторождения (Челябинская область). Создание нанокompозитов происходило следующим образом. Приготавливались растворы путем смешения 20 мл дистиллированной воды и различных масс вещества. Концентрация составляла 5 г/л, 10 г/л, 20 г/л. После полного растворения вещества взвешивали 30 г глауконита и добавляли к нему приготовленные растворы. Таким образом, были получены смеси глауконита с различным количеством хелата магния, сульфата магния и магниевой селитрой. Нанокompозиты с глауконитом и мочевиной были приготовлены почти аналогичным образом. Всего было приготовлено и протестировано 12 образцов. На данном этапе основные структурно-химические характеристики композитов и исходных

¹ НИ ТПУ, Томск, hitrin2604@mail.ru

фракций глауконитового песка определялись при помощи следующих методов: инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), метод Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ).

ИК-спектроскопия образцов показала, что с увеличением концентрации хелата магния в растворах, пики активированных нанокомпозитов, отвечающие за связанную воду, как внутри, так и снаружи кристаллической решетки становятся четче (рис. 1). Это указывает на уменьшение этой воды в исследуемых образцах, что может свидетельствовать об абсорбции магния за счёт ионно-обменных процессов. При этом пик, отвечающий за MgOHFe^{3+} , наоборот становится более размытым при увеличении количества магния в образце.

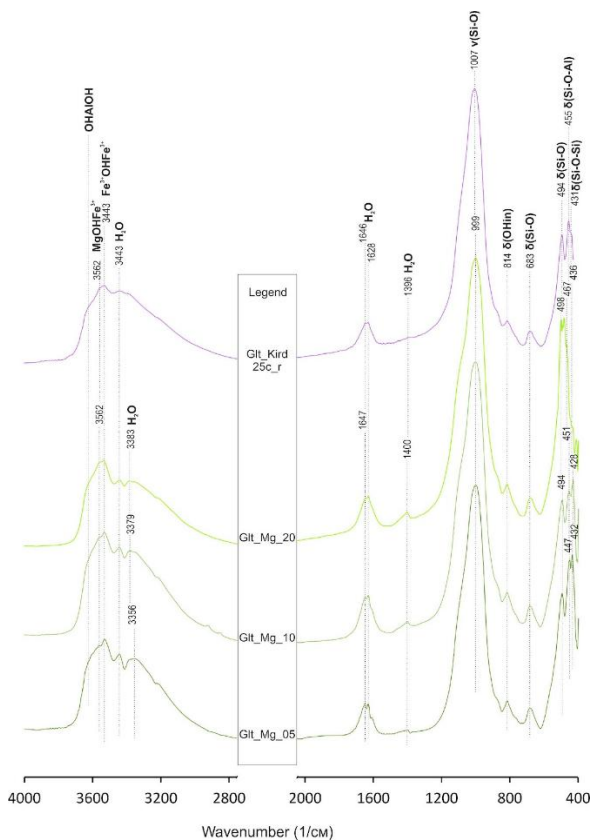


Рис. 1. ИК-Фурье спектры обогащенного глауконита (Glt_25c_r) и композитов Glt_Mg_05, Glt_Mg_10, Glt_Mg_20 с интерпретацией

Сканирующая электронная микроскопия позволила выявить систематическое изменение формы ультрамикро агрегатов и внутренней структуры глауконита (Рис. 2), а также увеличение содержания магния в нанокompозитах относительного исходного образца (Таблица 1). Более того, количество магния закономерно уменьшается от краевых частей глобул к их центру, что косвенно подтверждает процесс интеркаляции элемента.

Таблица 1. содержание некоторых элементов в нанокompозитах на основе данных СЭМ ЭДС (кислород по стехиометрии)

Образец	O	Mg	Al	Si	K	Fe
Glt_Mg_05	51,81	1,51	3,88	17,52	2,19	9,38
Glt_Mg_10	42,78	2,15	3,31	24,31	6,70	19,84

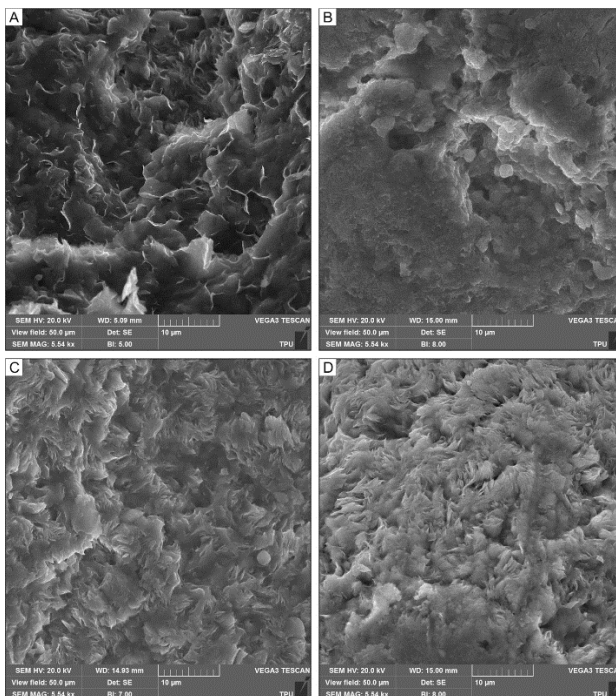


Рис. 2. СЭМ снимки обогащенного глауконита (А) и композитов Glt_Mg_05 (В), Glt_Mg_10 (С), Glt_Mg_20 (D)

Активация и изучение нанокompозитов позволили выявить систематическое изменение внутренней структуры, а также возможность абсорбции магния в разноразмерных порах глауконита Кирдинского месторождения. Полученные образцы представляют собой глауконит с

увеличенным содержанием магния. Наиболее перспективным нанокompозитом рекомендуется считать образец с концентрацией хелата магния в растворе 10 г/л.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-77-10002-П).

Рудмин, М.А., Рева, И.В., Якич, Т.Ю., Соктоев, Б.Р., Буяков, А.С., Табакаев, Р.Б., Ибраева, К. Монтмориллонит как перспективный композитный минерал для создания современных удобрений пролонгированного действия. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов 332, 14–22, 2021.

Хитрин, И.С., Рудмин, М.А. Активация смектита и фосфата: опыт создания минеральных удобрений комплексного действия, in: Структура, Вещество, История Литосферы Тимано-Северо Уральского Сегмента: Материалы 32-й Научной Конференции. ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, pp. 143–146, 2023.

Borges, R., Prevot, V., Forano, C., Wypych, F. Design and Kinetic Study of Sustainable Potential Slow-Release Fertilizer Obtained by Mechanochemical Activation of Clay Minerals and Potassium Monohydrogen Phosphate. Industrial & Engineering Chemistry Research 56, 708–716, 2017.

Matson, P.A. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. Science 277, 504–509, 1997.

Rudmin M. и др. Mechanical Activation of Smectite-Based Nanocomposites for Creation of Smart Fertilizers // Applied Sciences. Т. 12. № 809. С. 1–11, 2022.

МАТЕРИАЛЫ

**VII Российского Совещания по глинам и глинистым
МИНЕРАЛАМ – ГЛИНЫ-2025**

**СЕКЦИЯ С4: ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛИНИСТЫХ
МИНЕРАЛОВ И СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПРИ
ЗАХОРОНЕНИИ ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ**

Сравнение сорбции радионуклидов ^{90}Sr и ^{90}Y глинистыми минералами из карбонатных растворов

**Д.В. Грязнова¹, Г.О. Калашникова¹, О.И. Сийдра^{1,2},
В.Н. Яковенчук¹, Я.А. Пахомовский¹, О.Ф. Гойчук¹,
И.Р. Елизарова¹, Д.В. Трунов¹, М.Ю. Глазунова¹, И.В.
Смирнов²**

Глинистые минералы рассматриваются как природные сорбенты радионуклидов, особенно цезия и стронция, благодаря их способности к ионному обмену и широкому распространению. Геохимические условия формирования этих минералов и их ассоциаций позволяют оценивать риски при утилизации радиоактивных отходов. При определённых условиях глины эффективно поглощают и удерживают катионы Cs^+ и Sr^{2+} из водных сред (Wang W., 2024)

Согласно ряду исследований, биотит, обнаруженный в лесных почвах, загрязнённых в результате аварии на АЭС «Фукусима», характеризуется одной из наибольших удельных радиоактивностей среди природных минералов (Kwong-Moses D.S., 2020). Результаты молекулярного моделирования подтверждают избирательную сорбцию радионуклидов в межслоевых пространствах кристаллической решётки глинистых минералов (Zaunbrecher L.K., 2015). Кроме того, наряду со слюдами, значительный интерес представляют слоистые двойные гидроксиды (СДГ) как природного, так и синтетического происхождения, благодаря разнообразию химического состава и вариантов кристаллической структуры, включая наличие различных политипов (Seliverstov E.S., 2022).

Одним из актуальных и недостаточно изученных направлений радиохимии является оценка сорбционных свойств глинистых минералов по отношению к радионуклидам, в частности ^{90}Sr и ^{90}Y , из карбонатных водных сред. Несмотря на широкое распространение глинистых минералов, детальные исследования их взаимодействия с данными радионуклидами в карбонатных средах остаются ограниченными. В связи с этим в настоящей работе предпринята попытка комплексного изучения процессов сорбции стронция и иттрия рядом глинистых минералов.

Объектами исследования стали следующие природные минералы различного генезиса и состава:

– Галлуазит, отобранный в пределах Ново-Черемшанского никелевого месторождения, входящего в Верхнеуфалейскую группу (Fe-Ni)

¹ ФИЦ КНЦ РАН, Анатумы, daryamoskvina@mail.ru

² СПбГУ, Санкт-Петербург, siidra@mail.ru

месторождений, расположенных в Верхнеуфалейском районе Челябинской области (Южный Урал, Россия);

– Глауконит – слоистый минерал состава $(K, H_2O)(Fe^{3+}, Al, Fe^{2+}, Mg)_2(OH)_2 \cdot nH_2O$, собранный на обнажении в долине реки Луга, Ленинградская область;

– Нонтронит – железистый смектит, имеющий обобщённую формулу $(Ca_{0.5}, Na)_{0.3}Fe^{3+}_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$, полученный из Ермаковского бериллиевого месторождения, Кижингинский район, Республика Бурятия (Забайкалье);

– Волконскоит – хромсодержащий Fe-Mg-смектит с примерной формулой $CaO_3(Cr, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$;

– Пальгорскит – слоисто-цепочечный алюмосиликат $Mg_5(Si_4O_{10})_2(OH)_2(H_2O)_4 \cdot 4H_2O$, представленный образцами из Окуловского обнажения (Павловский район, Нижегородская область).

Для каждого из перечисленных минералов были определены значения коэффициента распределения K_d (мл/г). Полученные результаты позволили выявить наиболее эффективные природные сорбенты ^{90}Sr и ^{90}Y в карбонатной среде. К ним отнесены глауконит, нонтронит и волконскоит.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 24-63-00006.

Wang W., Dong Y., Ding Z., Song J., Yuan L., Zhang W., Lu Z., Li Y., Fan Q. Significant role of interlayer in strontium adsorption on weathered biotite. *Applied Clay Science*. 2024. 258, 107485

Kwong-Moses D.S., Elliot W.G., Wamper J.M., Powell B.A., Avant D.M. Sorption and desorption of radiocesium by muscovite separated from the Georgia kaolin. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. 211, 106074

Zaunbrecher L.K., Elliott W.C., Wampler J.M., Perdrial N., Kaplan D.I. Enrichment of cesium and rubidium in weathered micaceous materials at the Savannah River Site, South Carolina. *Environmental Science Technology*. 2015. 49, 4226–4234.

Seliverstov E.S., Golovin S.N., Lebedeva O.E. Layered double hydroxides containing rare earth cations: synthesis and applications. *Frontiers in Chemical Engineering*. 2022. 4, 867615.

Исследование свойств синтетических аналогов минералов линтисита и натисита для области мембранных технологий: разделение смесей азеотропного состава и газов

**Г.О. Калашникова¹, А.Ю. Пулялина^{1,2}, Д.В. Грязнова¹,
Я.А. Пахомовский^{1,2}, М.Ю. Глазунова^{1,2}, В.Н. Яковенчук³**

Большое количество современных исследований и публикационных работ посвящены изучению именно синтетических аналогов минералов, которые рассматриваются в качестве потенциальных допирующих добавок к полимерным мембранам (Truong, 2021). В работе (Shinke, 2023) отмечено, что более, чем в 90% методик применения мембранного разделения газов, разработанных за последние 30 лет, было использовано менее 10 полимеров (Dai, 2019). Традиционные полимерные мембраны имеют ряд недостатков, в том числе загрязнение при длительной эксплуатации, сложности в совмещении показателей между селективностью и проницаемостью, низкую термическую, химическую и механическую стабильность, а также химическую устойчивость (Esfahani, 2019). По этой причине гибридные мембранные продукты в последнее время привлекают к себе все большее внимание исследователей, позволяя тем самым значительно совершенствовать свойства уже существующих мембранных материалов.

В настоящей работе авторы сконцентрировали внимание на коммерчески доступном полимере сополиимид Р84 {(сополиимид 3,3',4,4'-бензофенонтетракарбонового диангидрида, который в ряде исследовательских работ хорошо зарекомендовал себя в качестве материала для ультрафильтрации, нанофильтрации, первапорации и разделения газов, а также сочетает хорошие механические свойства, химическую стойкость и низкую гидрофильность. В качестве растворителя для полимера использовали N, N-Диметилформамид (ДМФА). В качестве композитных добавок были выбраны синтетические аналоги минералов натисита и линтисита (рис. 1). Синтетические продукты были синтезированы непосредственно авторами проекта по разработанным и запатентованным ранее методикам.

Газопроницаемость мембран была измерена по отношению к индивидуальным газам высокой степени чистоты (He, O₂, N₂ и CO₂) барометрическим методом на лабораторной вакуумной установке, включающей статическую ячейку с эффективной площадью 5,25 см² при 30°C.

¹ФИЦ КНЦ РАН, Анапты, g.kalashnoikova@ksc.ru

²СПбГУ, Санкт-Петербург, alexandra.pulyalina@gmail.com

³ГИ ФИЦ КНЦ РАН, Анапты, v.yakovenchuk@ksc.ru

Дополнительно были проведены эксперименты по первапорации смеси воды (5-12%) и изопропанола. Площадь активной мембраны составляла 14,8 см².

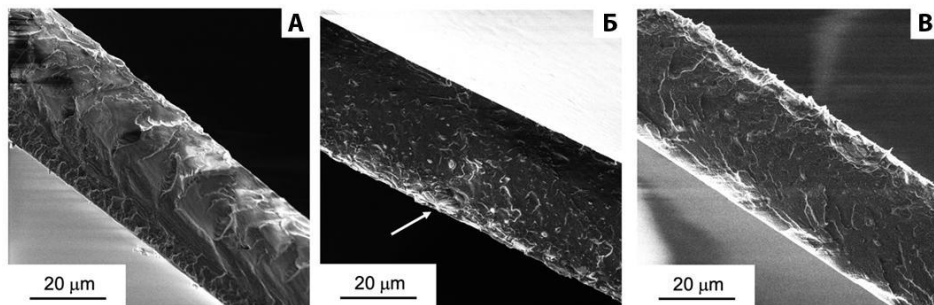


Рис. 1. СЭМ-снимки срезов (А) исходной полимерной мембраны на основе Р84, (Б) полимерной мембраны на основе Р84 с добавкой аналога линтисита, (В) полимерной мембраны на основе Р84 с добавкой аналога натисита

Методом СЭМ на сколах образцов отмечена плотная структура упаковки исходного Р84 и признаки пластической деформации (криорасщепление) в пленках композитов. Добавка натисита в Р84 обеспечили хорошую границу раздела частица-полимер, без явных дефектов и пустот. Это указывает на хорошую совместимость натисита с Р84 и равномерное диспергирование в полимерной матрице. По данным АСМ, введение наполнителя в Р84 матрицу существенно увеличивает шероховатость пленок композитов, особенно для пленки Р84/натисит, что обеспечивает большее количество сорбционных центров и большую эффективную площадь пленки. Оценка индекса первапорационного разделения (PSI) азеотропной смеси вода (12%)/ИПС показала, что композит Р84/натисит более чем в три раза эффективен, чем Р84. Полученные данные по деформационно-прочностным свойствам пленок композитов показали, что они обладают удовлетворительными механическими характеристиками и не требуют специальных условий при их дальнейшем использовании.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 24-23-00374.

Truong P. L., Kidanemariam A., Park J. A critical innovation of photocatalytic degradation for toxic chemicals and pathogens in air. J. Ind. Eng. Chem. 2021. 100. P. 19–39.

Shirke Y.M., et. al. Microporous Engelhard titanasilicate based polyamide membrane for water vapor dehumidification with excellent chemical resistance to toluene. Journal of environmental chemical engineering. 2023. 11. 109533.

Dai Z., et al. Highly CO₂-permeable membranes derived from a midblock-sulfonated multiblock polymer after submersion in water. NPG Asia Mater. 2019. Vol.11. P. 53.

Esfahani M.R., et. al. Nanocomposite membranes for water separation and purification: fabrication, modification, and applications. Sep. Purif. Technol. 2019. 213. P. 465–499.

Закономерности изменения свойств бентонитовых глин материалов инженерных барьеров безопасности в условиях ПЗГРО

Ф.С. Карпенко¹

Важнейшим вопросом, который должен решаться при захоронении радиоактивных отходов, является обеспечение их безопасности в течении длительного времени эксплуатации. При обустройстве пунктов захоронения РАО (ПЗГРО) для этой цели предусмотрена многоуровневая система защиты, одним из основных элементов которой выступают инженерные барьеры безопасности (ИББ), эффективность действия которых определяется, в первую очередь, свойствами материала барьера. Анализ свойств различных потенциальных глинистых материалов ИББ был ранее проведен автором с соавторами (Карпенко, 2023, Вознесенский и др., 2024) и он показал значительные преимущества бентонитовых глин по сравнению с каолиновыми и смесями с различным содержанием бентонита и каолинита.

Характеристика исходных свойств глин позволяет определить наиболее предпочтительные материалы для формирования ИББ, но не может дать прогноз их изменения в реальных условиях работы ПЗГРО при различных воздействиях, которые будут испытывать ИББ в условиях захоронения. Основными видами такого воздействия являются взаимодействие барьеров с подземными водами и температурное воздействие при изменении температуры материала барьера в результате разогрева по мере разложения отходов в контейнерах. Необходимость обеспечения безопасности работы ПЗГРО требует специального изучения этих вопросов.

Взаимодействие бентонитовых глинистых материалов ИББ с водой вызывает развитие в них процесса набухания за счет увеличения содержания влаги в них и соответствующего разуплотнения грунта, что вызывает изменение их свойств. Закономерности этого процесса определяются свойствами монтмориллонита, основного минерала бентонитовых глин. При низком общем содержании влаги в глинах основная ее часть поглощается минеральными частицами, что приводит к преимущественному развитию в них внутрикристаллического разбухания. Структурные контакты в глинах при этом в полной мере не могут сформироваться и свойства глин при этом остаются практически неизменными. Формирование гидратных пленок частиц и структурных контактов между ними начинает происходить только по мере окончания процесса внутрикристаллического разбухания, что приводит к постепенному изменению строения, прочностных и

¹ ИГЭ РАН, Москва, kafs08@bk.ru

деформационных свойств, характера набухания и усадки бентонитовых глин. Окончательное структурообразование бентонитовых глин как дисперсных связных грунтов происходит только при полном формирования гидратных пленок глинистых частиц и структурных контактов между ними. Это происходит при достижении влажности 22–29 % в глинах различных месторождений, при которой они характеризуются наиболее высокими показателями механических и физико-химических свойств. Дальнейшее увеличение количества влаги в глинах приводит к увеличению толщины гидратных пленок глинистых частиц, ослаблению сил взаимодействия на контактах между ними, приводящему к снижению показателей свойств глин.

Свойства бентонитовых глин не зависят от методики их увлажнения и закономерно близки в глинах, увлажнение которых проводилось предварительно при подготовке образцов, и при набухании образца. Давление набухания, развивающееся в бентонитовых глинах при их набухании, во всем диапазоне влажности не превышает предел их прочности на одноосное сжатие. Все это показывает, что увлажнение бентонитовых глинистых материалов не обязательно должно проводиться при изготовлении элементов ИББ из них. Элементы барьеров могут формироваться при влажности материалов 16 – 18 %, при которых они не обладают наилучшими механическими и физико-химическими свойствами, и их увеличение уже будет происходить естественным путем в условиях ПГЗРО в результате набухания глин при их взаимодействии с подземными водами.

Прочностные свойства бентонитовых глин, характер и величина их набухания в значительной степени зависят от температуры. Это связано с особенностями строения глин, важнейшую роль в котором играют гидратные пленки минеральных частиц, которые в основном определяют прочность глин и характер их набухания.

Повышение температуры бентонитовых глин от +20 до +40 °С происходит активизация процесса их набухания, увеличивается величина давления набухания и деформации свободного набухания, и повышается прочность. Дальнейшее увеличение температуры от +40 до +50 °С приводит к снижению этих показателей.

Такие закономерности определяются строением глин (Осипов В.И., Соколов В.Н., 2013, Карпенко Ф.С. и др. 2021). Формирование их микроструктуры и свойств происходит в результате образования структурных связей за счет действия сил притяжения и отталкивания между частицами и взаимодействия с водой гидратных пленок. Толщина гидратных пленок и, следовательно, сила их взаимодействия с частицами может меняться в зависимости от условий, в которых находятся глины. Одним из важнейших факторов, определяющих свойства гидратных пленок, является температура. При изменении температуры глин меняется величина расклинивающего

давления пленок, что закономерно вызывает изменения свойств самих глин в целом.

Наиболее активно изменение температуры оказывает влияние на прочностные свойства глин и их набухаемость, величина которых в значительной степени связана со свойствами воды гидратных пленок и их толщиной. Повышение температуры глин до температуры $+40^{\circ}\text{C}$ не приводит к существенному изменению толщины гидратных пленок, и оно оказывает влияние в первую очередь на увеличение их расклинивающего давления. Именно этим определяется повышение величины параметров набухания бентонитовых глин и их прочности в интервале температур от $+20$ до $+40^{\circ}\text{C}$. При дальнейшем повышении температуры выше $+40^{\circ}\text{C}$ начинается постепенное разрушение диффузных слоев гидратных пленок, что приводит к снижению величины их расклинивающего давления. Именно с таким изменением строения глин связано снижение величины параметров их набухания и прочности при повышении температуры от $+40$ до $+50^{\circ}\text{C}$.

Изменение температуры не оказывает существенного влияния на деформационные свойства глин, определяющиеся в первую очередь сжимаемостью минерального скелета грунта, не зависящей от температурных условий.

Карпенко Ф.С. Инженерно-геологическая характеристика свойств глинистых материалов инженерных барьеров безопасности ПЗГРО В сборнике: Глины и глинистые минералы – 2023. VI Российское Совещание по глинам и глинистым минералам «Глины-2023». Санкт-Петербург, 13-16 июня 2023 г. Материалы докладов. М.: ИГЭМ РАН. 2023. С. 190-191.

Вознесенский Е. А., Карпенко Ф. С., Крупская В. В., Закусин С. В. Ключевые геотехнические характеристики глинистых материалов для инженерных барьеров безопасности ПЗГРО на участке «Енисейский» Радиоактивные отходы. 2024. № 3 (28). С. 43—58.

Осипов В. И., Соколов В. Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013, с. 576.

Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Фролов С.И., Собин Р.В. Влияние на прочность глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях Геоэкология, 2021, № 1, с. 70-79.

Исследование диффузии иодид-анионов через образцы компактированного бентонита, модифицированного металлическим серебром

П.П. Козлов¹, Е.А. Тюпина¹, А.В. Прядко¹

Бентонитовые глины характеризуются высокой сорбционной способностью по отношению к катионам (Mayordomo et al., 2019), гидроизоляционными свойствами (Koroleva et al., 2024) и устойчивостью в различных агрессивных средах (Jozefaciuk, Bowanko, 2002, Прядко и др., 2020), ввиду чего они широко используются при переработке радиоактивных отходов (РАО): в качестве добавки в цементные матрицы, повышающие прочность удерживания радионуклидов (Abdel Rahman et al., 2013, Варлаков и др. 2006), для извлечения радиоцезия из органических РАО (Тюпина и др., 2010, Тучкова и др., 2010), а также рассматриваются в качестве основного материала инженерных барьеров безопасности (ИББ), предотвращающих миграцию радионуклидов за пределы проектируемого в настоящий момент пункта глубинного захоронения РАО 1 и 2 классов (ПГЗРО) на участке «Енисейский» (Красноярский край) (Крупская и др., 2023). Однако, одним из наиболее радиологически опасных компонентов РАО 1 и 2 классов является ^{129}I , представленный анионными формами I^- и IO_3^- , миграции которых бентонитовые барьеры не препятствуют (Kaufhold et al., 2018). Для локализации ^{129}I в пределах ПГЗРО необходимо включение в состав ИББ некоторого количества материала, обладающего сорбционными свойствами по отношению к анионам иода. Наибольший интерес среди сорбентов для анионов иода представляют серебросодержащие материалы с развитой поверхностью, характеризующиеся как наиболее высокой селективностью и необратимостью фиксации анионов иода ввиду наиболее низкой растворимости AgI и AgIO_3 , так и наибольшей устойчивостью к воздействию агрессивных сред (Тюпина, Прядко, 2024).

Целью работы является определение коэффициента диффузии I^- в образцах компактированного бентонита, модифицированного Ag .

В работе использован бентонит месторождения 10-й Хутор (Belousov et al. 2021), модифицированный Ag в количестве 0,5% от массы породы двумя ранее разработанными методами. Метод I основан на восстановлении $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{OH}$ формальдегидом, выделяющимся при термическом гидролизе гексаметилентетрамина (Тюпина и др., 2021), метод II основан на восстановлении Ag^+ раствором $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{OH}$ (Тюпина et al., 2024).

¹ РХТУ им Д.И. Менделеева, Москва, tk1972@mail.ru

Методом сквозной диффузии (Kong et al., 2021) с помощью разработанного диффузионного стенда проведено исследование скорости миграции I^- в образцах природного и модифицированного бентонита, компактированного до наименьшей допустимой для ИББ ПГЗРО сухой плотности ($1,2 \text{ г/см}^3$), при $C_0(I^-) = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}$ в модельном растворе подземной воды участка «Енисейский» в течение 6 месяцев. Концентрацию I^- определяли потенциометрически с помощью иономера-кондуктометра «Анион-4154» с иодид-селективным электродом ЭЛИС-131J и электродом сравнения ЭСр-101. Для каждой точки отбора проб рассчитывали отношение $\Sigma C_{bi}/C_0$, где C_{bi} – концентрация I^- в приёмнике в i -ой точке отбора проб, C_0 – концентрация I^- в источнике, после чего строили график зависимости $\Sigma C_{bi}/C_0$ от времени t (рис. 1).

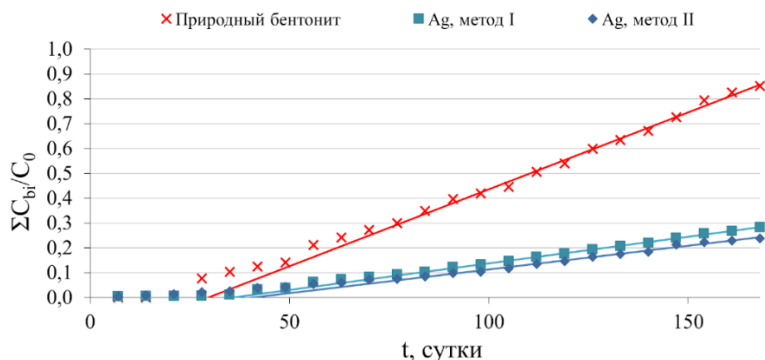


Рис. 1. Результаты исследования диффузии I^- через блоки природного и модифицированного бентонита

Линейный участок графика аппроксимировали прямой вида $\Sigma C_{bi}/C_0 = kt + b$, при $\Sigma C_{bi}/C_0 = 0$ определяли время задержки диффузии $t_x = -b/k$. Рассчитывали кажущийся коэффициент диффузии D_a , $\text{м}^2/\text{с}$ и эффективный коэффициент диффузии D_e , $\text{м}^2/\text{с}$ (таблица 1):

$$D_a = h^2 / 6t_x \quad (1)$$

$$D_e = kVh / A \quad (2)$$

где h – толщина образца, V – объём резервуара (100 мл), A – площадь поперечного сечения образца $A = \pi d^2/4$.

Таблица 1. коэффициенты диффузии I^- в образцах природного и модифицированного бентонита месторождения 10-й Хутор

Образец	$D_a \cdot 10^{12}, \text{м}^2/\text{с}$	$D_e \cdot 10^{11}, \text{м}^2/\text{с}$	R^2
Природный бентонит	$1,6 \pm 0,3$	$10,9 \pm 0,5$	0,995
Ag, метод I	$1,4 \pm 0,1$	$3,7 \pm 0,1$	0,998
Ag, метод II	$1,2 \pm 0,2$	$3,3 \pm 0,2$	0,992

Приведённые данные показывают, что модифицирование бентонита месторождения 10-й Хутор Ag в количестве 0,5% обоими разработанными методами снижает D_a в 1,2 – 1,4 раза, а D_e – в 2,9 – 3,3 раза, при этом метод нанесения Ag практически не оказывает влияния на значения D_a и D_e .

Таким образом, нанесение Ag на бентонит будет способствовать повышению изоляционной способности ИББ на основе бентонита по отношению к I-.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект №22-29-00607.

Варлаков А.П., Горбунова О.А., Баринов А.С. Модифицирующие комплексные добавки в технологиях цементирования радиоактивных отходов. Медицина труда и промышленная экология. 2006. 2, 29-34.

Крупская В.В., Тюпина Е.А., Закусин С.В. и др. Обоснование выбора глинистых материалов для разработки инженерных барьеров безопасности при изоляции РАО в ПГЗРО на участке недр «Енисейский». Радиоактивные отходы. 2023. 2(23), 98-112.

Прядко А.В., Тюпина Е.А., Закусин С.В. Влияние кислотного и щелочного воздействия на структуру, сорбционные и поверхностные свойства бентонитов. Успехи в химии и химической технологии. 2020. 34(9)(232), 17-19.

Тучкова А.И., Тюпина Е.А. Влияние температуры активации бентонита на его сорбционную способность к извлечению Cs-137 из вакуумных масел. Успехи в химии и химической технологии. 2010. 24(7)(112), 12-15.

Тюпина Е.А., Магомедбеков Э.П., Тучкова А.И. и др. Сорбционная очистка жидких органических радиоактивных отходов от 137Cs. Перспективные материалы. 2010. 8, 329-333.

Тюпина Е.А., Прядко А.В., Меркушкин А.О. Методика получения серебросодержащего сорбента на основе бентонита для фиксации соединений радиоиода. Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. 21(1), 26-32.

Abdel Rahman R.O., Zin El Abidin D.H.A., Abou-Shady H. Assessment of strontium immobilization in cement-bentonite matrices. Chemical Engineering Journal. 2013. 228, 772-780.

Belousov P., Chupalenkov N., Christidis G.E. et al. Carboniferous bentonites from 10th Khutor deposit (Russia): Composition, properties and features of genesis. Applied Clay Science. 2021. 215, 106308.

Jozefaciuk G., Bowanko G. Effect of acid and alkali treatments on surface areas and adsorption energies of selected minerals. Clays and Clay Minerals. 2002, 50(6), 771-783.

Kaufhold S., Dohrmann R., Ufer K. et al. Interactions of bentonite with metal and concrete from the FEBEX experiment: Mineralogical and geochemical investigations of selected sampling sites. Clay Minerals. 2018. 53(4), 745-763.

Kong J., Lee C.P., Sun Y. et al. Anion exclusion and sorption effect for compacted bentonite: the dependency of diffusion coefficients and capacity of HTO and Se (IV). Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2021. 328, 717-725.

Koroleva T., Krupskaya V., Tyupina E., et al. Impacts of impurity removal chemical pretreatment procedures on the composition and adsorption properties of bentonites. Minerals. 2024. 14(8), 736.

Mayordomo N., Alonso U., Missana T. Effects of γ -alumina nanoparticles on strontium sorption in smectite: Additive model approach. Applied Geochemistry. 2019. 100, 121-130.

Tyupina E.A., Pryadko A.V. Use of silver-containing sorbents in anionic species of radioactive iodine management in nuclear industry and the methods of obtaining them. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2024. 333(2), 599-613.

Тюпина Е.А., Прыдко А.В., Клименко О.М. Effect of silver chloride deposition technique on modified bentonite operating properties for radioactive iodide-ions localization in geological disposal facility for radioactive waste. Progress in Nuclear Energy. 2024. 171, 105198.

Эффективность работы магнитных композитных сорбентов цеолит/ $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при извлечении ионов никеля из водных растворов

А.В. Котова¹, Л.А. Новикова¹, Е.В. Томина¹

Очищение воды – самая главная задача человечества. Эта задача глобальна и связана не только с потреблением питьевой воды, но и с жизнью в океанах и морях. При этом важно создавать не только экономически целесообразные и эффективные способы очистки воды, но, в первую очередь, экологически безопасные технологии водоподготовки. Проблемы очистки сточных вод от тяжелых металлов включают высокую стоимость реагентов, образование токсичного осадка и необходимость утилизации отработанных материалов (Azanfire et al, 2025; Ловкис и др., 2023). Сорбционные процессы извлечения ионов тяжелых металлов из водной среды традиционно используют как природные (цеолиты, слоистые алюмосиликаты, и др.), так и синтетические материалы (иониты, активированные угли, и др.) (Gupta et al., 2021). Для практического использования сорбционных материалов важно установить количество операционных циклов, в которых сорбент эффективно работает без регенерации, а также возможность и эффективность проведения регенерации, от которой зависит длительность использования сорбента, либо превращение сорбента в отход после первого использования.

Цель данной работы включала оценку эффективности использования и регенерации новых композитных сорбентов на основе природного цеолита и наночастиц феррита кобальта-цинка в серии циклов сорбции ионов никеля из водного раствора.

Объектами исследования являлись природный цеолит (Zt), содержащий 95% клиноптилолита, выпускаемый фирмой Zeoscm, Словакия, синтетический образец смешанного феррита кобальта-цинка $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (F), полученный методом цитратного горения, и обладающий высокой магнитной восприимчивостью благодаря присутствию ионов Co^{2+} в структуре по сравнению с образцом феррита цинка, изученным ранее [Tomina et al, 2023]. Серия образцов композитов Zt-10F, Zt-20F, Zt-30F синтезирована путем введения соответственно 10, 20 и 30 мас. % фазы феррита в состав композита с цеолитом, аналогично (Tomina et al, 2023). Сорбционная способность композитных сорбентов изучена в нескольких циклах сорбции, до и после регенерации образцов, в водном растворе NiSO_4 с содержанием ионов Ni^{2+} 29,5 мг/л, при $t=20$ °С и соотношении сорбент/раствор=1:100. Время сорбции определено ранее и на каждом цикле составило 40 минут (Котова и др., 2024).

¹ ВГЛУ, Воронеж, novikov-la@yandex.ru

Для регенерации использовали 0,1 н раствор соляной кислоты при времени регенерации 30 минут.

Количественное определение ионов никеля в растворе проводили, используя фотоколориметрический метод анализа никеля в виде комплексов с диметилглиоксимом. Значения степени очистки воды вычисляли по формуле: $R, \% = (C_0 - C_p)C_0 \cdot 100\%$, где C_0 и C_p – начальная и равновесная концентрации раствора, моль-экв/л.

На Рис. 1 представлен процент очистки модельного раствора от ионов Ni^{2+} и его динамика с последующим циклом сорбции без регенерации исследуемых сорбентов.

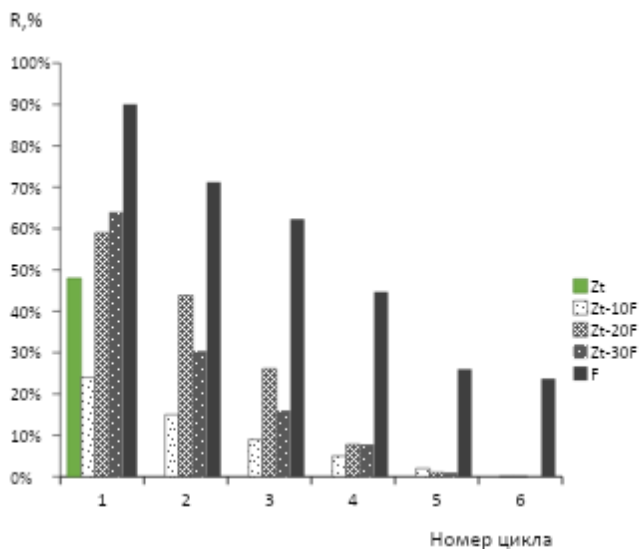


Рис. 1. Эффективность сорбционной очистки воды от ионов Ni^{2+} в зависимости от числа циклов сорбции без регенерации сорбентов

Эффективность очистки воды для образца природного Zt составляет 48% и обусловлена в основном катионообменной емкостью цеолита. Наночастицы феррита могут частично блокировать сорбционные центры, что отмечено по снижению степени очистки для образца Zt-10F. Однако, с увеличением доли феррита в составе композита (20-30%) сорбционная емкость к ионам Ni^{2+} возрастает, что обусловлено повышенным сродством ферритов к катионам металлов [Новикова и др., 2024], эффективность очистки воды на 1-вом цикле сорбции повышается до 64 %, при этом сорбенты проявляют заметные магнитные свойства и эффективную магнитную сепарацию при действии внешнего магнитного поля.

Табл.1. Сорбционная емкость отработанных композитных сорбентов цеолит/ $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ до и после регенерации раствором 0,1 н HCl

Сорбент	Сорбционная емкость, а, мг/г		
	1-й цикл	6-й цикл	После регенерации
Zt	2,4	-	2,4
Zt-10F	9,8	0,3	9,8
Zt-20F	20,4	0,1	19,8
Zt-30F	22,3	1,4	21,7
F	31,1	8,2	30,5

При изучении количества циклов сорбции без регенерации сорбента было определено оптимальное значение, обеспечивающее эффективное использование сорбентов: Zt-10F выдерживает 2-3 цикла; Zt-20F, Zt-30F может быть использован до 3-4 циклов; число возможных циклов сорбции для чистого феррита достигает шести. После всех проведенных циклов сорбенты подвергались регенерации с помощью раствора соляной кислоты 0,1 н концентрации. Из Табл. 1 заметно, что после регенерации сорбенты, прошедшие 5-6 циклов, имеют сорбционную ёмкость такую же, как и на первом цикле сорбции, что говорит об эффективности регенерации и сохранении сорбентами своих свойств и характеристик.

Таким образом, проведенные исследования позволяют заключить, что оптимальным сорбентом для очистки раствора от ионов никеля в нескольких циклах сорбции является композит Zt-20F, а использование 0,1 н раствора соляной кислоты для регенерация отработанных сорбентов представляется эффективным.

Azanfire B.-E., Bulgariu D., Cimpoeşu N., Bulgariu L. Efficient Removal of Toxic Heavy Metals on Kaolinite-Based Clay: Adsorption Characteristics, Mechanism and Applicability Perspectives. *Water* **2025**, 17, 1938. <https://doi.org/10.3390/w17131938>

Ловкис З. В., Павлова О. В., Трусова М. М. Сорбционная способность диатомита к тяжелым металлам на примере хрома (VI)// Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 88-95. – DOI 10.52275/2223-5396-2023-13-1-88-95. – EDN ECIJHZ.

Gupta A., Sharma V., Sharma K., Kumar V., Choudhary S., Mankotia P., Kumar B., Mishra H., Moulick A., Ekielski A., Mishra PK. A Review of Adsorbents for Heavy Metal Decontamination: Growing Approach to Wastewater Treatment. *Materials* (Basel). 2021 Aug 20;14(16):4702. doi: 10.3390/ma14164702.

Tomina E., Novikova L., Kotova A., Meshcheryakova A., Krupskaya V., Morozov I., Koroleva T., Tyupina E., Perov N., Alekhina Y. $\text{ZnFe}_{2\text{O}_4}$ /Zeolite Nanocomposites for Sorption Extraction of Cu^{2+} from Aqueous Medium. *AppliedChem* **2023**, 3, 452-476. <https://doi.org/10.3390/appliedchem3040029>

Котова А. В., Новикова Л. А., Томина Е. В., Мещерякова А. А. Оценка эффективности извлечения ионов никеля из водной среды новыми магнитными сорбентами цеолит/ $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ // Материалы III Международной научной конференции «Энергоресурсосберегающие и экологически безопасные технологии лесопромышленного комплекса», 26 сентября 2024 г., ВГЛТУ, Воронеж, С. 79-83.

Новикова Л. А., Томина Е. В., Молчанова О. Н., Жукова Е. А., Дорошенко А. В., Тюпина Е. А. (2024). Сорбция ионов меди из водных растворов высокодисперсными ферритами кобальта и цинка. Сорбционные и хроматографические процессы, 24(5), 695-710. <https://journals.vsu.ru/sorpchrom/article/view/1250>.

Обоснование выбора бентонита в качестве компонента инженерных барьеров безопасности в российской концепции глубинного геологического захоронения РАО

В.В. Крупская^{1,2}, С.В. Закусин^{1,2}, Т.А. Королева¹, О.В. Закусина¹, И.А. Морозов¹

Наиболее безопасным вариантом захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) и отработанного ядерного топлива является их размещение в пункте глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Безопасность захоронения обеспечивается благодаря принципу многобарьерности, одним из компонентов является буферный слой из глинистого материала. В ходе геологоразведочных работ потенциально пригодным для создания ПГЗРО был признан участок «Енисейский». Для обоснования выбора материала буферного слоя инженерных барьеров безопасности (ИББ) при создании ПГЗРО в России проводились комплексные работы по изучению состава, строения и свойств различных глинистых материалов. С учетом российского опыта создания ИББ были рассмотрены бентониты разных месторождений, каолины и смеси на основе бентонита и каолина.

Для оценки пригодности использования глинистых материалов в качестве буферного слоя ИББ изучались состав, строение и свойств как исходных порошковых образцов (Krupskaya et al., 2025; Вознесенский и др., 2024), так и компактированных образцов до разных плотностей скелета. При выборе материала ИББ рассматривались функциональные, миграционные и эволюционные свойства материалов (Крупская и др., 2023).

Последние 5 лет проводились комплексные исследования преобразования бентонитов в различных условиях ПГЗРО. Были выявлены основные аспекты преобразования состава бентонита и строения смектита при взаимодействии, как с модельными растворами, имитирующими поровые воды кристаллического массива на целевой глубине при повышенной температуре (Морозов и др., 2025), так и с продуктами выщелачивания бетона и коррозии металлических материалов (Morozov et al., 2022). Наиболее негативным воздействием на бентонит в условиях ПГЗРО считаются продукты выщелачивания бетона, которые создают высокоминерализованную среду с высокими значениями pH (>12). Проведенные исследования по термохимическому воздействию концентрированных растворов щелочей (NaOH и KOH) в течение длительного времени при повышенной температуре показали высокую устойчивость рассматриваемых бентонитов, в первую

¹ ИГЕМ РАН, Москва, krupskaya@ruclay.com

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

очередь месторождений Минусинской впадины и, в частности, месторождения 10-й Хутор. Результаты исследований используются для моделирования эволюции системы инженерных барьеров, что является неотъемлемой частью прогнозирования жизненного цикла ПГЗРО после закрытия.

Таким образом, комплексные исследования позволили обоснованно выделить как наиболее перспективные к разработке в составе буферного слоя бентониты месторождений Минусинской впадины, в частности месторождения 10-й Хутор. Месторождение имеет вулканогенно-осадочный генезис и располагается в крупной бентонитоносной провинции, запасы составляют порядка 14 млн тонн (Krupskaya et al., 2025). В сравнении с другими рассмотренными бентонитами, глины месторождений Минусинской впадины обладают высоким содержанием смектита – 65-75%, что определяет приемлемые показатели изоляционных свойств, характеризующиеся по сорбции радионуклидов, водопроницаемости, скоростям диффузии и др. и высокой устойчивостью в прогнозируемых условиях ПГЗРО.

Работы проведены совместно с ИБРАЭ РАН, ИГЭ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова (химический и геологический факультеты), Сколтех, ИФХЭ РАН, ООО «Деко-Сервис» и др.

Krupskaya V.; Zakusin S.; Zakusina O.; Belousov P.; Pokidko B.; Morozov I.; Zaitseva T.; Tyupina E.; Koroleva T. On the Question of Finding Relationship Between Structural Features of Smectites and Adsorption and Surface Properties of Bentonites. *Minerals* 2025, 15, 30.

Вознесенский Е.А., Карпенко Ф.С., Крупская В.В., Закусин С.В. Ключевые геотехнические характеристики глинистых материалов для инженерных барьеров безопасности ПГЗРО на участке «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2024. № 3 (28) С. 43-58.

Крупская В. В., Тюпина Е. А., Закусин С. В., Ильина О. А., Савельева Е. А. Обоснование выбора глинистых материалов для разработки инженерных барьеров безопасности при изоляции РАО в ПГЗРО на участке недр «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 98-112.

Морозов И. А. [и др.]. Преобразование бентонитовых глин инженерных барьеров безопасности в модельных условиях // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2025. № 5. В печати

Morozov I. [и др.]. Bentonite–Concrete Interactions in Engineered Barrier Systems during the Isolation of Radioactive Waste Based on the Results of Short-Term Laboratory Experiments // *Applied Sciences*. 2022. № 6 (12). С. 3074.

Исследование сорбции кобальта полиминеральной глиной месторождения «Городное»

Д.А. Кузьмук¹, Н.А. Маковская¹

В настоящее время в Республике Беларусь полиминеральные монтмориллонитовые глины рассматриваются в качестве одного из основных материалов для использования в составе инженерных барьеров безопасности приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов (Маковская и др., 2023). Одной из перспективных глин является тугоплавкая глина месторождения «Городное» (Брестская область), характеризующаяся относительно высоким содержанием монтмориллонита (не менее 30 %).

В данной работе изучены сорбционные свойства образцов глины месторождения «Городное» (Г) по отношению к кобальту (^{60}Co) в сравнении с образцом бентонитовой глины месторождения «10-й хутор», РФ, Хакасия (10X); характеристики исследуемых образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов

Образец	Цвет	Массовая доля монтмориллонита, %, по ГОСТ 28177-89
Г1	желтый	35,5
Г2	темно-коричневый	33,0
Г3	желтый	43,8
Г4	темно-коричневый	29,7
10X	серый	58,0

Для исследуемых образцов, предварительно обработанных 0,01 М NaClO_4 , получена изотерма сорбции кобальта в диапазоне исходной концентрации Co^{2+} от $5,5 \cdot 10^{-10}$ до 10^{-3} моль/л. Установлено, что изотерма сорбции кобальта образцами глин Г1–Г4 имеет схожий вид, который говорит об отсутствии селективных центров сорбции. На рис.1 приведена изотерма сорбции кобальта на образце Г2 в координатах $\lg K_d - \lg C_p$ и $\lg C_t - \lg C_p$, где K_d (Co) – коэффициент распределения кобальта, л/кг, C_p и C_t – равновесные концентрации кобальта в растворе и в образце глины, моль/л и моль/г, соответственно.

¹ Научное учреждение «ОИЭЯИ – Сосны», Минск, dariakuzmuk@mail.ru

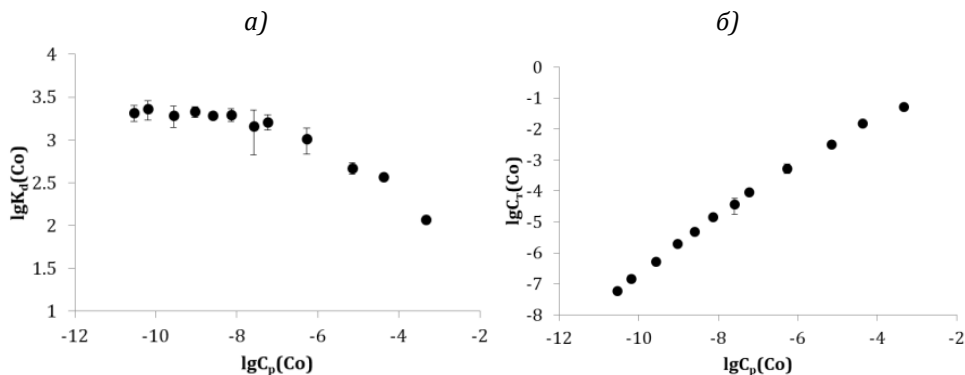


Рис.1. Изотерма сорбции кобальта на образце Г2
в координатах $\lg K_d - \lg C_p$ (a) и $\lg C_m - \lg C_p$ (б)

Коэффициенты распределения кобальта (K_d (Co)) для исследуемых образцов, полученные из линейных участков изотерм сорбции, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты распределения кобальта

Образец	Г1	Г2	Г3	Г4	10X
K_d (Co), л/кг	$3,0 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^3$

Установлено, что для образцов глины месторождения «Городное» характерны высокие значения коэффициента распределения кобальта (более 10^3 л/кг) во всем диапазоне исходных концентраций кобальта, соответствующих возможному содержанию ^{60}Co в очень низко-, низко- и среднеактивных радиоактивных отходах (до 10^{10} Бк/л или $4,0 \cdot 10^{-6}$ моль/л). При дальнейшем повышении концентрации кобальта значения K_d (Co) падают до значений порядка 10^2 л/кг при исходной концентрации кобальта $C_0(\text{Co}) = 10^{-3}$ моль/л.

Характер изменения $K_d(\text{Co})$ с ростом исходной концентрации кобальта в растворе сильно отличается для бентонитовой глины (10X): при повышении содержания Co в растворе $K_d(\text{Co})$ возрастает, достигая максимума при $C_0(\text{Co})$ около 10^{-5} – 10^{-4} моль/л. Различия в сорбционных свойствах образцов Г1–Г4 и 10X при высоких исходных концентрациях кобальта вероятнее всего связаны с разным pH раствора в равновесии с образцом глины: для бентонитовой глины характерны высокие значения pH (более 8,5), при которых ионы кобальта в значительной степени гидролизуются (Omar et al.).

Как для образцов в условиях проведенного эксперимента (0,01 M NaClO_4), так и для исходных образцов глины «Городное» характерен pH в диапазоне 6,5–7,0 (табл. 3). Таким образом, радионуклиды кобальта будут

находиться преимущественно в форме Co^{2+} при диффузии в инженерных барьерах безопасности, выполненных из глины месторождения «Городное».

Таблица 3. Значения pH растворов в равновесии с образцами глин

Образец	pH раствора в условиях эксперимента (тв: ж = 1:100, 0,01 М NaClO_4 , $t = 3$ сут)	pH раствора для исходного образца в дистиллированной воде (тв: ж = 1:10)
Г1	6,6	6,9
Г2	6,6	6,8
Г3	6,5	7,0
Г4	6,8	6,8
10X	9,0	8,7

Маковская Н.А., Леонтьева Т.Г., Баклай А.А. Глины Республики Беларусь в качестве инженерных барьеров при захоронении радиоактивных отходов. Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2023, Т. 68, № 3, С. 252 – 264.

Omar H., Arida H., Daifullah A. Adsorption of «Co radionuclides from aqueous solution by raw and modified bentonite. Appl. Clay Sci. 2009, V. 44, P. 21–26.

Изменение строения и свойств глинистых материалов при нагреве до 80 °С

А.Д. Кутхуджина^{1,2}, А.Б. Ермолинский¹, М.С. Чернов¹

Бентонитовые глины являются перспективными материалами для создания инженерных барьеров безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов благодаря широкому спектру свойств: низкой водопроницаемости, способности к сорбции, ионному обмену и набуханию. При разработке инженерных барьеров безопасности важную роль играет исследование поведения материалов в модельных условиях захоронения, в том числе при повышенных температурах, возникающих в результате тепловыделения при радиоактивном распаде. Согласно (Дерягин и др., 1987), при нагреве свыше 70 °С происходит изменение строения двойного электрического слоя (ДЭС), прежде всего, его диффузной части, что ведет к изменению физико-механических свойств глинистого материала. Характер изменения ДЭС под воздействием повышенных температур провоцирует повышение агрегированности и, как следствие, неоднородности строения, приводящей к ухудшению прочностных свойств материалов. По исследованиям (Королёв и др., 1979) в агрегатах наблюдается увеличение размеров межмикроагрегатных пор и микроагрегатов при повышении температуры.

Были проведены исследования влияния повышения температуры на изменения строения и прочностных свойств образцов на основе глинистых минералов – каолинита и смектита. С целью устранения структурных неоднородностей для исследований были выбраны модельные образцы-пасты из каолина Просяновского месторождения и бентонита месторождения 10-й Хутор при влажностях 41% и 64%, соответственно. Приведенные выше значения влажности были выбраны с целью получения близких по консистенции образцов. Строение образцов на различном масштабном уровне исследовалось с помощью растровой электронной микроскопии и компьютерной томографии. Прочностные свойства изучались методом одноплоскостного неконсолидированного недренированного среза. Деформационные свойства изучались методом компрессионного сжатия.

В результате проведенных исследований при нагреве от 20 до 80 °С было выявлено увеличение размеров структурных элементов за счет их агрегации. Строение образца бентонита оказалось более чувствительным к температурному преобразованию ДЭС ввиду большей выраженности гидратных пленок на поверхности частиц смектита по сравнению с

¹ МГУ, Москва, kuthudzhinaad@my.msu.ru

² ИГЕМ РАН, Москва

каолинитом. Обнаружено, что повышение температуры влияет на увеличение ориентированности структурных элементов в плоскости среза. Согласно проведенным исследованиям физико-механических свойств, выявлено снижение сдвиговой прочности образцов, что объясняется тепловым преобразованием двойного электрического слоя. В зоне среза микроагрегаты глинистых частиц приобретают ориентировку, перпендикулярную прикладываемой нагрузке. В свою очередь, повышение температур после проведения компрессионных испытаний приводит к ликвидации приобретенной при компрессии гомогенности микростроения.

Исследования проводились в рамках государственного задания МГУ и с использованием оборудования, приобретенного в рамках реализации Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М.: Издательство Наука, 1987. – 398 с.

Королёв В.А., Коломенский Е.Н., Соколов В.Н. Влияние температуры на изменение микростроения водонасыщенных глин при их уплотнении. Инженерная геология, журнал АН СССР. 1979. 2, 77–86.

Сорбция цезия и стронция на бентонитовых глинах различных месторождений

**И.Р. Меньшикова-Тонян¹, А.С. Семенкова¹, В.С. Свительман²,
В.В. Крупская³, А.Ю. Романчук¹, С.Н. Калмыков¹**

Для долговременной изоляции радиоактивных отходов предполагается создание инженерных барьеров безопасности, перспективными материалами для которых являются бентонитовые глины. Ввиду высокого содержания монтмориллонита – минерала подгруппы смектита – они обладают низкой водопроницаемостью и высокими сорбционными свойствами. Состав и свойства бентонитовых глин могут изменяться в зависимости от месторождения. В состав отходов могут входить изотопы цезия $^{134,137}\text{Cs}$ и стронция ^{90}Sr , которые обладают химическим сходством с натрием и кальцием и способны замещать их в живых организмах, обуславливая биологическую токсичность. Таким образом, для обоснованного выбора оптимального материала и обеспечения долгосрочной безопасности хранилищ требуется установление закономерностей процессов сорбции на бентонитовых глинах различных месторождений, а также разработка унифицированной модели сорбции радионуклидов с учетом их минерального состава, характеристик раствора и концентрации радионуклидов.

В работе была изучена сорбция Cs^+ и Sr^{2+} на 11 образцах бентонитовых глин различных месторождений: как перспективных месторождений РФ и СНГ (10 Хутор, Таганское, Зырянское и другие), так и широко изученные мировые образцы МХ-80 (США, Вайоминг), Кунипия Ф (Япония), FEBEX (Испания) и другие. Было проведено термодинамическое моделирование полученных изотерм сорбции в широком диапазоне концентраций радионуклидов с использованием различных подходов: при использовании констант реакции из литературы для различных типов центров, а также путем варьирования параметров констант и концентраций сорбционных центров для одного, двух и трех типов центров. Моделирование изотерм и подбор параметров проводились при помощи ПО PHREEQC (David L. Parkhurst & Appelo, 2013) и MOUSE (Svitelman et al., 2025).

Для Cs^+ и Sr^{2+} характерно взаимодействие с бентонитовыми глинами по механизму ионного обмена. Полученные изотермы связывания Cs^+ в широком диапазоне концентраций радионуклида демонстрируют наличие двух типов сорбционных центров для всех исследуемых образцов (Рис. 1А). Моделирование полученных изотерм сорбции Cs^+ показало, что наилучшее описание получено для модели с двумя типами центров, как при

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, iton612@yandex.ru

² ИБРАЭ РАН, Москва

³ ИГЕМ РАН, Москва

использовании литературных подходов, так и в подходе с варьированием. Подхода с одним типом центров оказалось недостаточно для описания сорбции цезия на бентонитовых глинах, а подход с тремя типами центров незначительно улучшает описание экспериментальных данных. По результатам моделирования с двумя типами центров были определены константы связывания, которые находятся в диапазоне 5.7–7.6 и 1.2–1.7 для высоко- и низкоселективных центров, соответственно.

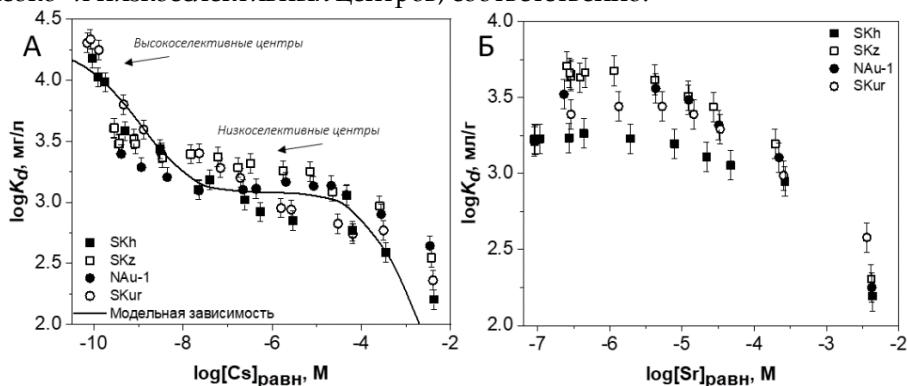


Рис. 1. Изотермы сорбции Cs^+ (А) и Sr^{2+} (Б) на бентонитовых глинах

Сопоставление концентраций полученных центров с индивидуальными характеристиками образцов глин, такими как минеральный состав, емкость катионного обмена, удельная площадь поверхности и заряд слоя, позволяет предположить существование корреляции концентрации высокоселективных центров со структурными особенностями, ввиду наличия зависимости с октаэдрическим зарядом слоя (Рис. 2А), а низкоселективных центров – с содержанием смектита (Рис. 2Б).

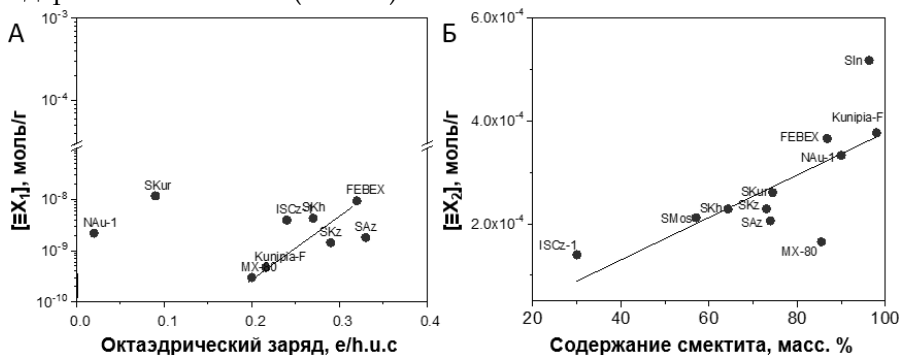


Рис. 2.

Корреляция концентраций сорбционных центров Cs^+ , полученных при моделировании: (А) – для высокоселективных центров, (Б) – для низкоселективных центров

Наблюдается общая закономерность сорбции Sr^{2+} (рис. 1Б) и Cs^+ (рис. 1А) при концентрациях $>10^{-7}$ М – сорбция повышается в ряду SKh – SKur – Nau-1 – SKz, что свидетельствует о присутствии одного типа сорбционных центров в данном случае. Показано, что на сорбцию Sr^{2+} большое влияние оказывают двухзарядные катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+}), способные конкурировать за связывание, а также катион Sr^{2+} , вымываемый из глин в концентрации 10^{-8} М и влияющий на сорбцию в области низких концентраций. Предложенный модельный подход, учитывающий условия среды, способен прогнозировать сорбцию радионуклидов, взаимодействующих по механизму ионного обмена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект 23-73-30006).

David L. Parkhurst, & Appelo, C. A. J. (2013). Description of Input and Examples for PHREEQC. In *U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43*.

Svitelman, V., Saveleva, E., Lebedev, A., Kiselev, G., Nuzhny, A., Rukavichnikova, A., & Kolo din, E. (2025). MOUSE software package: challenges and experience of fitting uncertainty management into long-term safety assessment puzzle. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(10), 103721. <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103721>

Взаимодействие глинистых материалов инженерных барьеров безопасности с металлами

И.А. Морозов¹, В.В. Крупская¹, С.В. Закусин¹, П.П. Козлов²

Разрабатываемая концепция глубинного захоронения радиоактивных отходов (РАО) подразумевает мультибарьерный подход к изоляции РАО. В рамках этого подхода проектируется система инженерных барьеров безопасности (ИББ), каждый компонент из которой выполняет свои функции обеспечения безопасности (Крупская и др., 2023). В российской концепции в качестве материала контейнера с РАО как один из вариантов рассматривается углеродистая сталь, а в качестве основного материала ИББ предполагается использовать бентонитовые глины (Крупская и др., 2018).

Многочисленные исследования как в мировой практике (Hadi et al., 2019; Wersin et al., 2015; Sasamoto et al., 2017 и многие другие), так и в отечественной (Болдырев и др., 2021), показывают, что обеспечение безопасного захоронения РАО невозможно без исследований взаимодействия между собой компонентов ИББ. Отдельное внимание стоит обратить на взаимодействие глинистых материалов ИББ с материалом контейнера с РАО. Применение в качестве материалов контейнера меди (SKB, Швеция) и рассмотрение альтернативных, поставили задачу по детальному исследованию преобразований глинистых материалов ИББ на контакте с металлами.

В ходе выполнения работ были проведены эксперименты длительностью до 4 месяцев по взаимодействию бентонитов месторождения 10-й Хутор и Таганское с такими потенциальными материалами контейнеров как сталь (ст3), медь (М1) и нержавеющая сталь (AISI 304) при повышенных температурах (90 и 120°C). Параллельно были поставлены эксперименты по коррозии данных металлов без присутствия бентонита. Все эксперименты проводились в модельном растворе поровых вод участка «Енисейский» (Morozov et al., 2022). Скорости коррозии металлов были оценены гравиметрическим методом по ГОСТ Р 9.907-2007.

По результатам исследований были получены данные о скорости коррозии металлов в присутствии бентонитов, а также новые данные, касающиеся преобразования глинистых минералов на контакте с образцами металлов.

В ранее проведенных экспериментах по взаимодействию стали с бентонитами месторождений 10-й Хутор и Таганское не наблюдалось изменения в структуре смектитов (Морозов и др., 2025), в то время как на

¹ ИГЕМ РАН, Москва, ivan.morozov@yandex.ru

² РХТУ имени Д.И. Менделеева, Москва, kozlovpavel96@gmail.com

поверхности стали было обнаружено образование триоктаэдрических разновидностей слоистых силикатов (рис. 1). Подобные различия в результатах экспериментов встречались и в исследованиях других групп, в которых даже в ходе длительного воздействия образовывались триоктаэдрические фазы (Kaufhold et al., 2017), хотя в других сходных экспериментах не были найдены (Wersin et al., 2021).

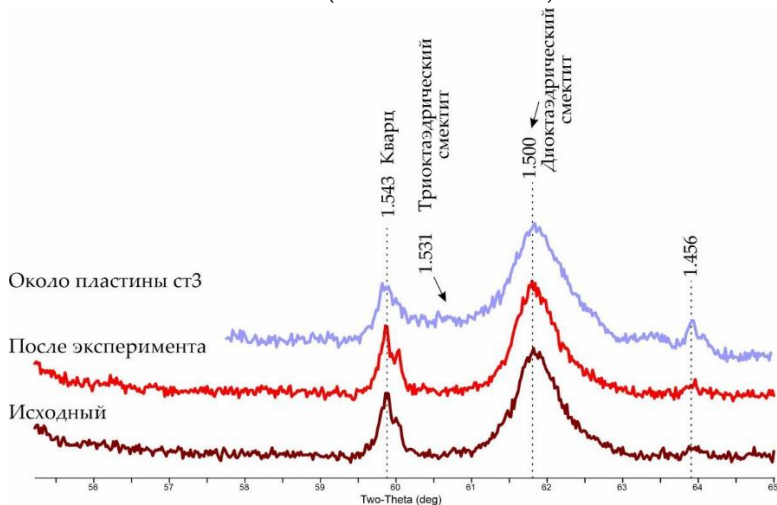


Рис. 1. Фрагменты дифрактограмм (область 060 глинистых минералов) бентонита месторождения 10-й Хутор

Как и в ранее проведенных работах других исследователей (Болдырев и др., 2021; Болдырев, 2023; Smart et al., 2017 и др.), средние скорости коррозии уменьшаются с увеличением длительности эксперимента. Стоит отметить, что, несмотря на меньшие скорости коррозии в присутствии бентонита месторождения Таганское в эксперименте длительностью 1 месяц (рис. 2), скорость коррозии при температуре 90°C остается выше, чем у бентонита месторождения 10-й Хутор.

Результаты экспериментов могут быть использованы при моделировании долгосрочных преобразований системы инженерных барьеров безопасности захоронения РАО в геологических формациях.

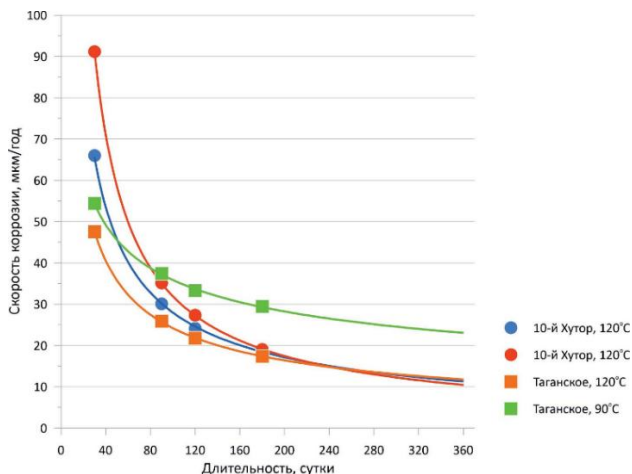


Рис. 2. Изменение скорости коррозии стали Ст3 в присутствии бентонитовых месторождений 10-й Хутор и Таганское при температурах 90 и 120°C

Болдырев К.А. Моделирование коррозии углеродистой стали с учетом различных факторов в применении к прогнозированию срока службы контейнеров. Радиоактивные отходы. 2023. № 22. С. 45–57.

Болдырев К.А., Сафонов А.В., Абрамова Е.С., Гладких Н.А., Крючков Д.В. Исследование коррозии углеродистой стали СТЗ в присутствии микроорганизмов, выделенных из подземных вод на участке «Енисейский». Радиоактивные отходы. 2021. Т. 16. № 3. С. 103–113.

Крупская В.В. и др. Обоснование выбора глинистых материалов для разработки инженерных барьеров безопасности при изоляции РАО в ПГЗРО на участке недр «Енисейский». Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 98–112.

Крупская В.В. и др. Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия. Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2 (3). — С. 30—43.

Морозов И.А. и др.. Преобразование бентонитовых глин инженерных барьеров безопасности в модельных условиях. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. (в печати)

Morozov I. and др. Bentonite-Concrete Interactions in Engineered Barrier Systems during the Isolation of Radioactive Waste Based on the Results of Short-Term Laboratory Experiments. Applied Sciences. 2022. Т. 12, № 6. P. 3074.

Hadi J. и др. Eighteen years of steel–bentonite interaction in the FEBEX in situ test at the Grimsel Test Site in Switzerland. Clays Clay Miner. 2019. Т. 67, № 2. С. 111–131.

Sasamoto H. et al. Mineralogical, physical and chemical investigation of compacted Kunigel V1 bentonite in contact with a steel heater in the ABM test package 1 experiment, Äspö laboratory, Sweden. Clay Miner. Cambridge University Press, 2017. Т. 52, № 1. С. 127–141.

Smart N. R., Reddy B., Rance A. P., Nixon D. J., Diomidis N. The anaerobic corrosion of carbon steel in saturated compacted bentonite in the Swiss repository concept. Corrosion Engineering, Science and Technology. 2017. Т. 52. № sup1. С. 113–126.

Wersin P., Jenni A., Mäder U.K. Interaction of corroding iron with bentonite in the ABM1 experiment at ÄSPÖ, Sweden: A microscopic approach. Clays Clay Miner. 2015. Т. 63, № 1. С. 51–68.

Wersin P., Hadi J., Jenni A., Svensson D., Grenèche J. M., Sellin P., Leupin O. X. Interaction of corroding iron with eight bentonites in the alternative buffer materials field experiment (ABM2) // Minerals. 2021. Т. 11. № 8. С. 1–24.

ГОСТ Р 9.907-2007 - МЕТАЛЛЫ, СПЛАВЫ, ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. 2007.

Применение природных глинистых материалов для обеспечения безопасного захоронения графитовых радиоактивных отходов

**А.О. Павлюк^{1,2}, Е.В. Беспала^{1,2}, С.Г. Котляревский², Р.И. Кан²,
Е.П. Зеленецкая¹, С.С. Мешков², Л.А. Глушко²**

В настоящее время в мире насчитывается более 100 энергетических и промышленных уран-графитовых реакторов (УГР), большинство из которых остановлены и находятся в стадии вывода из эксплуатации (ВЭ).

Проблемой ВЭ УГР являются значительные количества радиоактивного графита, образовавшиеся в процессе их эксплуатации. В мире уже накоплено ~250 000 тонн облучённого графита, в том числе в Российской Федерации ~ 60 000 тонн (Дорофеев А.Н., 2019). В настоящее время на международном уровне проблема графита решается в рамках различных программ и проектов GRAPA (Anthony Wickham, 2017) и др.

Радиоактивность облученного графита обусловлена присутствием в нем долгоживущих продуктов активации (Павлюк А.О., 2021), в том числе ключевых ^{14}C , ^{36}Cl . При этом по приблизительным оценкам около 5 % (~3000 тонн) от всего графита в РФ содержит значительное количество долгоживущих актинидов "топливного" происхождения (изотопы Am, Cm, Pu, Np, U и т.д.).

Графитовые РАО можно разделить на различные потоки (графитовая крошка, сменные элементы, графит с просыпями топлива и др.) с учетом физико-механических характеристик, удельной активности, возможного способа переработки, транспортирования, хранения, захоронения и других факторов. Для решения проблемы безопасного захоронения некоторых потоков графитовых РАО целесообразно рассматривать применение глинистых материалов, которые обладают уникальными свойствами, способные обеспечить надежную изоляцию радионуклидов на весь период опасности.

В работе представлен опыт (рис. 1) применения глинистых материалов для вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов по варианту «Захоронение на месте» (Павлюк А. О., 2018). Рассмотрены различные перспективные направления, связанные с добавлением природных глинистых материалов в графитовые радиоактивные отходы для приведения их к установленному законодательством РФ критериям приемлемости для захоронения. Приведены результаты исследования радиационной стойкости барьерных глинистых материалов и обзор по теме влияния радиационного

¹ ТПУ, Томск, pavlyuk17@tpu.ru

² ДЦ УГР, Северск, rao@dnrc.ru

облучения на различные характеристики барьерных глинистых материалов (Мишанькин А. Ю., 2023).

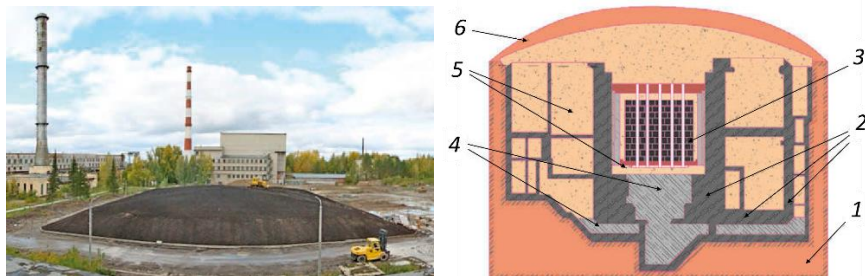


Рис. 1. Пункт хранения РАО ЭИ-2 АО «ОДЦ УГР» (г. Северск): 1 — вмещающие породы; 2 — стены шахты реактора и конструкции здания (бетон); 3 — графитовая кладка и основные металлоконструкции реактора; 4 — забетонированные пространства под реактором; 5 — барьерный материал на основе глины в полостях реакторного пространства и помещениях, окружающих шахту реактора; 6 — защитный экран

Дорофеев А.Н., Комаров Е.А., Захарова Е.В., Волкова А.Г., Линге И.И., Иванов А.Ю., Уткин С.С., Павлюк А.О., Котляревский С.Г. К вопросу захоронения реакторного графита // Радиоактивные отходы. 2019. №2. С. 18-30. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-18-30.

Anthony Wickham, Hans-Jurgen Steinmetz, Patrick O'Sullivan, Michael I. Ojovan. Updating irradiated graphite disposal: Project 'GRAPA' and the international decommissioning network. Journal of Environmental Radioactivity 171 (2017) 34-40

Павлюк А.О., Котляревский С.Г., Кан Р.И., Волкова А.Г., Захарова Е.В., Илюхина М.А., Горшков В.Б., Дорофеев А.Н., Зиннуров Б.С., Комаров Е.А. Подходы к характеристике графитовых блоков УГР по бета-излучающим радионуклидам ^{14}C и ^{36}Cl . Апробация на реакторах типа РБМК-1000 // Радиоактивные отходы. 2021. №2.

Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Марков С. А., Шатров М. В. Организация и результаты мониторинга пункта хранения радиоактивных отходов, созданного при выводе из эксплуатации промышленного уран-графитового реактора ЭИ-2 // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 3 (4). — С. 69—77.

Мишанькин А. Ю., Чубреев Д. О., Павлюк А. О., Язиков Е. Г. Оценка радиационной стойкости барьерных глинистых материалов // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023, Том. 29, №3, 47-55

Микропористые и нанотрубчатые глинистые минералы (глауконит и галлуазит) как носители нутриентов в управляемых и полифункциональных удобрениях

М.А. Рудмин¹, Е.В Тарарушкин², И.С Хитрин¹, Э. Даси¹

В условиях глобальных задач улучшения сельского хозяйства возрастает потребность в развитии материалов с управляемой системой доставки питательных веществ (Tilman et al., 2001). В этих целях наработаны практики использования различных мембран или «контейнеров», сдерживающих высвобождение важных нутриентов для растений (Singh et al., 2025). Минералы подкласса филлосиликатов, обладающие развитой пористостью, сорбционной способностью и структурной изменчивостью, всё чаще и активнее рассматриваются как матрицы для создания подобных удобрений (Dasi et al., 2025, 2024; Khitrin et al., 2024). Среди них особый интерес в рамках авторских исследований представляют глауконит – калиево-железистый минерал из группы слюд с дефицитом межслоя, зачастую образующих глобулярные агрегаты размером до 200-400 мкм (Dasi et al., 2024), а также галлуазит – минерал из группы каолинитов, образующий природные нанотрубки размером более 30 мкм в длину и до 200 нм в диаметре (Yuan et al., 2015).

Актуальность применения этих минералов обусловлена их разнородным пористым пространством, экологической чистотой, способностью к сорбированию ионов и молекул вариативных размеров, а также к диффузионному обмену (Rudmin et al., 2023; Yuan et al., 2015). В совокупности эти свойства открывают возможности потенциально управлять высвобождением нутриентов в зависимости от условий внешней среды. Глауконит преимущественно исследуется как сорбционно-структурный носитель питательных элементов в почвенных системах в виде минеральной добавки (Dasi et al., 2024; Khitrin et al., 2024; Rudmin et al., 2023). Галлуазит в свою очередь демонстрирует потенциал для создания фольярных и инъекционных композитов, для более «точечного» или «адресного» применения (Dasi et al., 2025; Maximov et al., 2023).

Целью текущих исследований является обоснование роли глауконита и галлуазита как перспективных матричных систем на уровнях от нано- до макропор для развития удобрений нового поколения на основе тонкой иерархии взаимодействий нутриентных соединений с активными центрами минеральной матрицы.

¹ НИ ТПУ, Томск, rudminma@tpu.ru

² НИУ ВШЭ, Москва, etatarushkin@hse.ru

В ходе многолетних работ использовался глауконит из трёх месторождений (Кирдинское (ООО «Глаукос»), Каринское (ООО «Глауконит») и Бакчарское), активированный различными способами, и природный галлуазит из Челябинской области (ООО «Галлуазит-Урал»), модифицированный микронутриентами. Экспериментальные испытания создаваемых минеральных композитов включали исчерпывающую физико-химическую характеристику (РДА, ИК, СЭМ-ЭДС, ПЭМ-ЛЭД, ТГ-ДТА-МС, ИСП-МС, БЭТ и пр.), молекулярно-динамическое моделирование (Cygan et al., 2004), оценку сорбции и высвобождения питательных веществ, а также лабораторные тесты агрохимические с прямым внесением в почвы (глауконит) или распылением (галлуазит и глауконит).

Наиболее актуальные исследования показали, что глауконит и галлуазит представляют собой два принципиально различных типа минеральных матриц с разнопористыми системами, каждая из которых отличается способностью к адресной сорбции и контролируемому высвобождению нутриентов.

При активации глауконита растворами NH_4NO_3 с «тонким» шагом концентрации 1-3-6-9-12 % была выявлена пороговая концентрация (~6 %), при которой фиксируются структурные изменения, усиление внутренней координации аммония и переупорядочивание внешнесферных анионов. Это указывает на перестройку иерархии координационных связей и достижение насыщения активных центров в микропористом пространстве минерала. Определены различия в высвобождении аммония и нитратов, которые связаны с локализацией ионных форм в структуре глауконита. Биотесты на овсе показали до 16% прироста урожайности по сравнению с контролем на композитах с 9% концентрацией NH_4NO_3 .

Выявлено, что мезо- и макро пористые центры глауконитовых глобул дополнительно сорбируют молекулы карбамида, демонстрируя ступенчатую кинетику высвобождения аммония и высокую диффузионную ёмкость природных «гранул» (Rudmin et al., 2023). Модификация глауконита с микроэлементами (Zn, Cu, B) сохраняет кристаллическую структуру минерала, задействует мезопористость и формирует ионные комплексы различного типа координации, обеспечивая увеличение всхожести и биомассы растений при малых дозах (Khitrin et al., 2024).

Галлуазит был применён в качестве матрицы для микроэлементов (Zn, Cu, B, I), «загруженных» во внутренние полости («сайты») нанотрубок (Dasi et al., 2025). Было установлено, что фольярное нанесение обеспечивает инъекционный (точечный или уколоподобный) эффект нанотрубчатых композитов. Это даёт локализованное поступление микроэлементов к растениям, что в перспективе обладает потенциалом применения для восстановления ослабленных или инфицированных растений, включая их

семена. Высокая адгезия галлуазитовых композитов к листовой поверхности микрозелени (руккола) и стимулирующий эффект (прирост биомассы до 34%) подтверждают их потенциал в адресной агротехнологии.

Оба минерала демонстрируют устойчивость, при некоторой структурно-морфологической изменчивости и экологическую безопасность, что делает их перспективными компонентами новых полифункциональных удобрений.

Работа выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10002-П. Авторы выражают благодарность М.И. Канинину (ООО «Галлуазит-Урал»), Р.М. Юмангуену (ООО «Глаукос») и В.А. Едапину (ООО «Глауконит») за предоставленные образцы галлуазита и глауконита для исследований.

Cygan, R.T., Liang, J.J., Kalinichev, A.G., 2004. Molecular Models of Hydroxide, Oxyhydroxide, and Clay Phases and the Development of a General Force Field. *Journal of Physical Chemistry B* 108, 1255–1266. <https://doi.org/10.1021/JP0363287>

Dasi, E., Khitrin, I., Ruban, A., Maximov, P., Maximova, N., Yuan, P., Rudmin, M., 2025. Targeted micronutrient nanofertilizers of injectable actions based on Cu/B/I halloysite nanotube composites. *Microporous and Mesoporous Materials* 394, 113663. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2025.113663>

Dasi, E., Rudmin, M., Banerjee, S., 2024. Glauconite applications in agriculture: A review of recent advances. *Applied Clay Science* 253, 107368. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107368>

Khitrin, I., Maximov, P., Dasi, E., Ibraeva, K., Ponomarev, K., Maximova, N., Belousov, P., Ruban, A., Rudmin, M., 2024. Glauconite-Based Nanocomposites with Zn/Cu/B: Multifunctional Micronutrient Fertilizers. *Minerals* 15, 1–18. <https://doi.org/10.3390/min15010012>

Maximov, P., Dasi, E., Kalinina, N., Ruban, A., Pokidko, B., Rudmin, M., 2023. Zinc-Intercalated Halloysite Nanotubes as Potential Nanocomposite Fertilizers with Targeted Delivery of Micronutrients. *Materials* 16, 6729. <https://doi.org/10.3390/ma16206729>

Rudmin, M., Maximov, P., Dasi, E., Kurovsky, A., Gummer, Y., Ibraeva, K., Kutugin, V., Soktoev, B., Ponomarev, K., Tararushkin, E., Makarov, B., Ruban, A., 2023. Intercalation of carbamide to globular glauconite by chemical processing for the creation of slow-release nanocomposites. *Applied Clay Science* 243, 107075. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107075>

Singh, K., Singh, R., Nwosu, N.J., Omara, P., Sharma, L., Dunn, B.L., Singh, H., 2025. Optimizing Nutrient Delivery in Agronomic Crops: A Review of Enhanced Efficiency Fertilizers. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 1, 1–15. <https://doi.org/10.1002/jpln.12010>

Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W.H., Simberloff, D., Swackhamer, D., 2001. Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science* 292, 281–284. <https://doi.org/10.1126/science.1057544>

Yuan, P., Tan, D., Annabi-Bergaya, F., 2015. Properties and applications of halloysite nanotubes: recent research advances and future prospects. *Applied Clay Science* 112–113, 75–93. <https://doi.org/10.1016/j.CLAY.2015.05.001>

Органоглины как адсорбенты для органических поллютантов

**И.В. Хайданов¹, Л.В. Переломов¹, Т.С. Дудникова²,
М.М. Герцен²**

Большая удельная поверхность, химическая и механическая стабильность, способность многих минералов к набуханию, наличие разнообразных функциональных групп, заряд поверхностей делают глинистые минералы отличными адсорбирующими материалами. Однако, гидрофильный характер и отрицательный заряд поверхности глин ограничивает их использование для поглощения органических веществ с крупными гидрофобными фрагментами и анионов. Поэтому для расширения круга адсорбатов и повышения эффективности минеральных адсорбентов проводят их модификацию органическими веществами, обладающими свойствами ПАВ, с получением органоглин с разной степенью гидрофобности (Perelomov et al., 2021).

Синтез органоглин основан на химических реакциях и физико-химических взаимодействиях, в которые могут вступать глинистые минералы с органическими соединениями. Оптимальным способом синтеза органоглин является взаимодействие глинистых минералов с сурфактантами в водном растворе (Guégan, 2019). Некоторые авторы используют органические растворители для малорастворимых в воде органических модификаторов (Alcântara et al., 2016). Органические молекулы также могут быть интеркалированы в сухие глинистые минералы без использования растворителей путем сплавления (De Paiva et al., 2008).

Нами были синтезированы органоглины на основе бентонита Саригюхского месторождения, («BentoGroupMinerals») и водорастворимых сурфактантов разных типов, взятых в количествах, превышающих емкость катионного обмена. Эффективность модификации была доказана методом элементного (CHN) анализа и ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. В сорбционных экспериментах было изучено поглощение полученными органоглинами антибиотиков разных групп (пенициллинов, аминогликозидов, амфениколов, сульфаниламидов, тетрациклинов), а также ПАУ - высокомолекулярного бенз(а)пирена и низкомолекулярного нафталина. Модификация природного бентонита различными типами ПАВ приводит к увеличению поглощения антибиотиков, молекулы которых в условиях эксперимента являются гидрофобными. Наибольшее увеличение

¹ ТГПУ им. Л.Н. Толстого, Тула, ikhaidanov@gmail.com

² ЮФУ, Ростов-на-Дону, ts-dudnikova@tyto98.ru

адсорбции отмечено для органоглины, синтезированной на основе бентонита и цетримониум хлорида - катионного ПАВ. Так для антибиотика амоксициллина при концентрации в растворе 100 мг/л и соотношении твердой и жидкой фазы 1:50 исходный бентонит поглощал 5-7% антибиотика, органоглина на основе сунатала (анионного ПАВ) – 16%, органоглина на основе лаураминооксида (неионогенного ПАВ) – 11%, органоглина, синтезированная на основе цетримониум хлорида (катионного ПАВ) – 94% амоксициллина. Как модель Ленгмюра, так и модель Фрейндлиха, исходя из высоких значений коэффициентов корреляции, удовлетворительно описывают поглощение антибиотиков природными органоглинами. Тем не менее, для уравнения Ленгмюра в большинстве случаев коэффициенты корреляции несколько выше.

Адсорбция ПАУ на органоглинах значительно увеличивается по сравнению с исходным бентонитом. Наибольшая величина максимальной адсорбции бенз(а)пирена отмечена для органоглины на основе лауроминооксида (неионогенного сурфактанта), нафталина – для органоглины с лауроминооксидом (неионогенным ПАВ) и кокоамфодиацетатом натрия (амфотерным ПАВ). При этом адсорбция бенз(а)пирена органоглинами на порядок выше, чем нафталина. Изотермы адсорбции бенз(а)пирена и нафталина органоглинами относятся к L-форме по классификации Джайлса и к группе I(b) по классификации IUPAC. Как показывает аппроксимация экспериментальных данных различными моделями адсорбции, процесс поглощения ПАУ лучше описывается уравнением Ленгмюра и, соответственно, является преимущественно монослойным.

Осуществлена оценка токсичности синтезированных органоглин на почвенных бактериях, сельскохозяйственных растениях и с помощью бактериальной тест-системы «Эколюм».

Таким образом, органоглины на основе монтмориллонита и различных сурфактантов являются эффективными адсорбентами для антибиотиков и ПАУ. Они могут быть использованы в качестве специфических ремедиантов в загрязненных почвах и водах при обязательном внимании к вопросу их индивидуальной токсичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 25-17-20037 «Поглощение антибиотиков разных групп природными и модифицированными глинистыми минералами».

Perelomov L., Mandzhieva S., Minkina T., ...Pinsky D., Barakhov A. The synthesis of organoclays based on clay minerals with different structural expansion capacities. Minerals. 2021. 11(7), 707. <https://doi.org/10.3390/min11070707>

Guégan R. (2019). Organoclay applications and limits in the environment. *Comptes Rendus. Chimie*. Second international symposium "Clays and ceramics for environmental applications". 2019. 22(2-3), 132-141. doi: 10.1016/j.crci.2018.09.004

Alcántara A. C. S., Darder M., Aranda P., Ruiz-Hitzky E. Effective intercalation of zein into Na-montmorillonite: role of the protein components and use of the developed biointerfaces. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2016. 7, 1772–1782. doi:10.3762/bjnano.7.170

De Paiva L. B., Morales A. R., Valenzuela Díaz F. R. Organoclays: Properties, preparation and applications. *Applied Clay Science*. 2008. 42(1-2), 8–24. doi: 10.1016/j.clay.2008.02.006

Материалы

VII Российского Совещания по глинам и глинистым минералам – ГЛИНЫ-2025

СЕКЦИЯ С5: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В НАУКЕ О ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛАХ И СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Молекулярно-динамическое исследование взаимодействия глины и кварца в водном растворе

А.А. Глушак¹, Е.В. Тарарушкин¹, Г.С. Смирнов¹

Глины рассматриваются как один из важных адсорбентов в задачах захоронения радиоактивных отходов (Болдырев и др., 2024). Для исследования адсорбции радионуклидов на поверхностях глин активно применяются методы молекулярной динамики (Liu et al., 2022). Силовое поле ClayFF является одним из классических межатомных потенциалов для описания взаимодействия глинистых минералов с водными растворами и ионами в них. (Sygan et al., 2021) Хотя большинство работ на настоящий момент рассматривают взаимодействие исключительно с базальными поверхностями глинистых минералов, в последнее время также появляются работы, исследующие влияние краевых эффектов на взаимодействие глинистых частиц с водой (Shen et al., 2025).

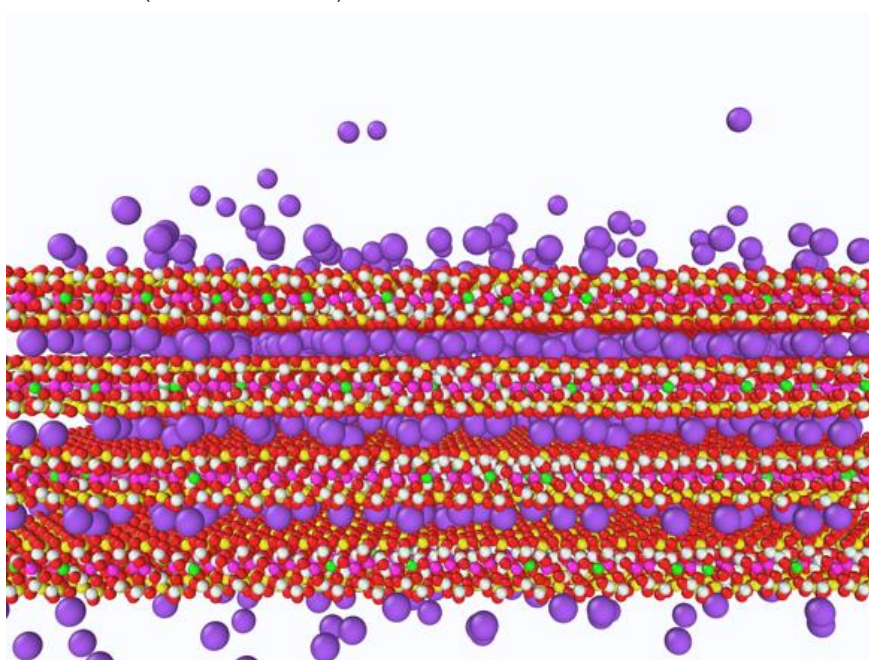


Рис. 1. Атомистическая модель глины и гидратированного Na⁺

¹ НИУ ВШЭ, Москва, aglushak@hse.ru

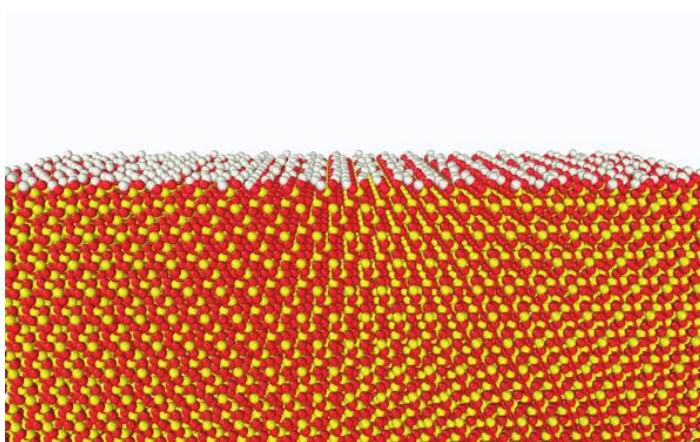


Рис. 2. Атомистическая модель 1010 поверхности α -кварца

При этом в молекулярно-динамических работах ранее практически не рассматривалось влияние песка, который присутствует в реальных физических системах. В данной работе представлена модель взаимодействия глины (рис. 1) с кварцем (рис. 2) в водном растворе на примере натриевого монтмориллонита. Показана стабильность системы, рассмотрено взаимодействие молекул воды с поверхностями глины и кварца.

$$g_{r1} = 1 - \langle \sum_{i \neq 0} r_i \rangle \quad (1)$$

$$CN = 4\pi \rho_0 r_1 r_2 g_{dr} \quad (2)$$

Исследованы структурные и динамические свойства воды в нанопорах между монтмориллонитом и кварцем. Посчитаны парные функции распределения и выведены значения функции координационного числа для взаимодействия гидроксидов с водой. Получены оценки диффузионных свойств системы.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ. Расчеты выполнены на суперкомпьютере «CHARISMa» НИУ ВШЭ.

Болдырев К.А., Глушак А.А., Писарев В.В., Смирнов Г.С., Тарарушкин Е.В., Михайлова П.С. Применение метода молекулярной динамики в задачах прогнозирования поведения материалов инженерных барьеров безопасности ПЗРО. Радиоактивные отходы. 2024. 3(28). 83-95.

Liu X, Tournassat C, Grangeon S, Kalinichev A.G., Takahashi Y., Fernandes M.M. Molecular-level understanding of metal ion retention in clay-rich materials. Nature Reviews Earth&Environment. 2022. 3. 461-476.

Cygan R.T, Greathouse J.A., Kalinichev A.G., Advances in Clayff molecular simulation of layered and nanoporous materials and their aqueous interfaces. Journal of Physical Chemistry C. 2021. 125. 17573-17589.

Shen X, Zheng X., Bourg I.C., A coarse-grained model of clay colloidal aggregation and consolidation with explicit representation of the electric double layer. Journal of Colloid And Interface Science. 2025. 683. 1188-1196.

Экспериментальные и теоретические исследования координации урана на смектитовых глинах

**А.Д. Крот¹, Е.В. Тарарушкин^{1,2}, А.Л. Тригуб³, И.Э. Власова¹,
С.Н. Калмыков¹**

Понимание взаимодействия между ураном и глинистыми минералами на атомистическом уровне имеет решающее значение для решения проблемы загрязнения окружающей среды и обращения с ядерными отходами. В данной работе мы сосредоточились на определении молекулярной структуры поверхностных видов урана (VI) на смектитовой глине с помощью комбинации EXAFS-спектроскопии и *ab initio* моделирования молекулярной динамики (AIMD).

Экспериментально исследовались образцы бентонитовых глин трех различных месторождений при различных pH и различных концентрациях урана. Для выяснения структуры адсорбированного вещества на наномасштабе были проведены AIMD вычисления для координационных моделей уранила (UO_2^{2+}) на базальной поверхности и на краях атомистической модели монтмориллонита (рис.1).

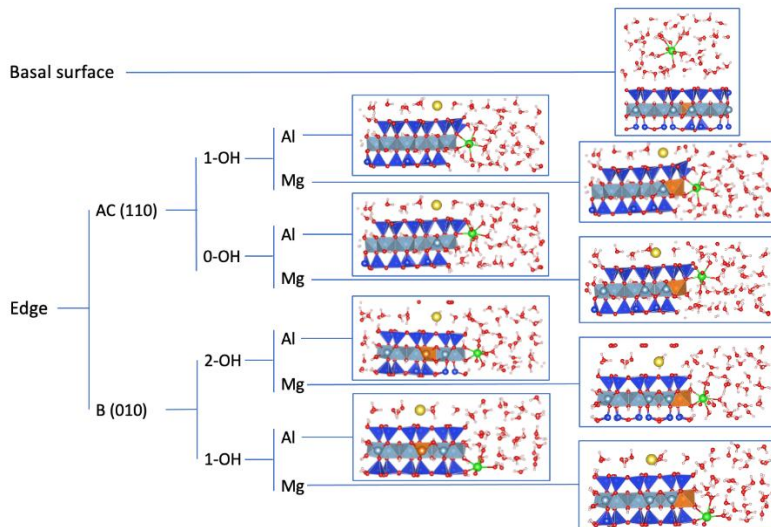


Рис. 1. Атомистические модели глины и гидратированного UO_2^{2+}

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, anna.d.krot@gmail.com

² НИУ ВШЭ, Москва, evgeny.tararushkin@yandex.ru

³ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, alexander.trigub@gmail.com

По итогам исследований линейные комбинации экспериментальных EXAFS-спектров со спектрами из AIMD моделирований (рис.2) позволили выявить доли адсорбированных урановых комплексов, присутствующих при pH 3, 5 и 8. При низком pH видовое распределение адсорбированного катиона уранила состоит в основном из базального комплекса внешней сферы. При увеличении pH до 5 краевые комплексы на поверхности (110) становятся преобладающими, а при pH 8 катион уранил в основном локализуется на (010) поверхности глинистого минерала.

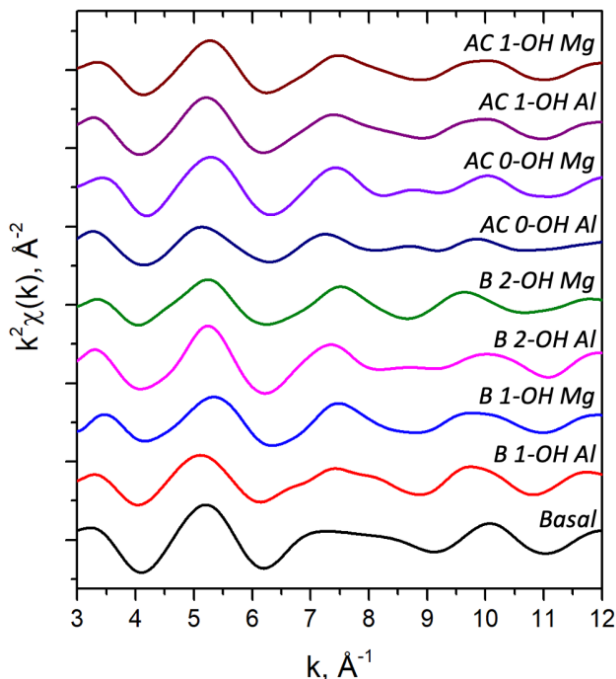


Рис. 2. EXAFS спектры, вычисленные из AIMD моделирований

Благодаря моделированию методом молекулярной динамики и экспериментальных спектроскопических методов впервые раскрыта структура адсорбированных ураниловых комплексов на поверхности глинистых минералов на наноуровне (Krot et al., 2025).

Исследование осуществлено в рамках МГУ грант РНФ 19-73-20051 (экспериментальная часть) и 23-73-30006 (теоретическая часть).

Krot A. D., Tararushkin E.V., Trigub A. L., Vlasova I. E., Kalmykov S. N. Uranium coordination on clay surface at nanoscale: Integration of EXAFS data and Ab initio molecular dynamics. Applied Clay Science. 2025. 274, 107863.

Компьютерное атомистическое моделирование цементных AFm фаз

Е.В. Тарарушкин¹, А.А. Глушак¹, Г.С. Смирнов¹

Затвердевший портландцемент, широко применяемый в строительной отрасли, состоит из различных гидратированных фаз, включая так называемые AFm фазы. Составы и строения AFm фаз в цементном камне могут быть довольно сложными, но структура большинства цементных AFm фаз аналогична природному минералу гидрокаломит (Baquerizo et al., 2015). Поэтому, AFm фазы относят к слоистым двойным гидроксидам (LDH), которые характеризуются следующей формулой $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6 \cdot \text{A} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, где A – анионы (OH^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}). Молекулы H_2O и анионы расположены в межслоевом пространстве LDH и последние компенсируют положительный заряд минерального слоя $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]^+$ гидроксидного соединения. Таким образом, цементные AFm фазы являются представителями анионных глин.

Несмотря на то, что AFm фазы это минорные фазы гидратированного портландцемента они могут играть важную роль в удерживании различных анионов, включая радионуклиды (например, TcO_4^- , Cl^- , I^- , SeO_4^{2-}). Однако AFm фазы чувствительны к относительной влажности и температуре окружающей среды, pH и ионной силы порового раствора в гидратированных цементах. Нестабильность AFm фаз проявляется, прежде всего, в структурных фазовых переходах, а также их растворению, которое приводит к высвобождению анионов. Поэтому механизмы анионного обмена и стабильность AFm фаз являются одними из центральных тем экспериментальных исследований (Baquerizo et al., 2015). Однако экспериментальные методы исследования ограничены и не могут полностью характеризовать физико-химические процессы формирования AFm фаз, их стабильность и анионный обмен. Вышеуказанные проблемы особенно не ясны на атомистическом уровне. В связи с этим возникает необходимость в применении методов компьютерного атомистического моделирования.

В настоящем исследовании применяется метод классической молекулярной динамики (МД) для исследования механизмов адсорбции различных анионов (Cl^- , Br^- , I^- , NO_2^- , NO_3^- , TcO_4^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , SeO_4^{2-}) на базальной поверхности AFm фазы. Некоторые из вышеперечисленных анионов (Cl^- , I^- , SeO_4^{2-}) уже были исследованы при моделировании AFm фазы (Glushak et al., 2024; Glushak et al., 2025). Силовое поле ClayFF (Cygan et al., 2004) используется в качестве модели, описывающей потенциальную энергию взаимодействующих частиц. Модель ClayFF позволяет адекватно учитывать структурные особенности таких сложных неупорядоченных

¹ НИУ ВШЭ, Москва, evgeny.tararushkin@yandex.ru

материалов как гидратированные фазы портландцемента, и моделировать различные свойства таких систем в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными (Cygan et al., 2004).

В результате моделирований методом МД исследованы структурные свойства AFm фаз с различными анионами в своем составе. Определены центры адсорбции на базальной поверхности минеральной фазы для различных анионов. Вычислены энергии адсорбции анионов и составлен ряд из анионов по величине энергии адсорбции по отношению к базальной поверхности AFm фазы. Определены константы анионного обмена.

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Baquerizo L., Matshei T., Scrivener K., Saeidpour M., Wadso L. Hydration states of AFm cement phases. Cement and Concrete Research. 2015. 73, 143–157.

Glushak A.A., Tararushkin E.V., Smirnov G.S., Kalinichev A.G. Molecular dynamics simulation of hydrocalumite as adsorbent for anionic radionuclides. Applied Geochemistry. 2024. 170, 106089.

Glushak A.A., Tararushkin E.V., Smirnov G.S. A classical force field for selenium oxyanions in aqueous solutions and minerals. Journal of Molecular Liquids. 2025. 422, 126904.

Cygan R.T., Liang J.-J., Kalinichev A.G. Molecular models of hydroxide, oxyhydroxide, and clay phases and the development of a general force field. Journal of Physical Chemistry B. 2004. 108, 1255–1266.

ЧЛЕНЫ ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТА

	Фамилия	Имя	Отчество	Город	Эл. почта	Название организации
Председатели организационного комитета						
1	Сухих	Леонид	Григорьевич	Томск	sukhikh@tpu.ru	НИ ТПУ
2	Боев	Артем	Сергеевич	Томск	asboev@tpu.ru	НИ ТПУ
Ученый секретарь						
3	Максимова	Наталья	Андреевна	Томск	maximova_na@tpu.ru	НИ ТПУ
Состав организационного комитета						
4	Даси	Эван	Шван Сало	Томск	de01@tpu.ru	НИ ТПУ
5	Лукьянова	Елена	Анатольевна	Томск	lea@tpu.ru	НИ ТПУ
6	Максимов	Прокопий	Николаевич	Томск	maximov_pn@tpu.ru	НИ ТПУ
7	Молукпаева	Диана	Калибековна	Томск	dkm3@tpu.ru	НИ ТПУ
8	Николаева	Анастасия	Николаевна	Томск	ann18@tpu.ru	НИ ТПУ
9	Пасечник	Елена	Юрьевна	Томск	paseyu@tpu.ru	НИ ТПУ
10	Хитрин	Иван	Сергеевич	Томск	ish9@tpu.ru	НИ ТПУ

ЧЛЕНЫ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА

	Фамилия	Имя	Отчество	Город	Эл. почта	Название организации
Председатель программного комитета						
1	Крупская	Виктория	Валерьевна	Москва	krupskaya@ruclay.com	ИГЕМ РАН
2	Рудмин	Максим	Андреевич	Томск	rudminma@gmail.com	НИ ТПУ
Состав программного комитета						
3	Белоусов	Петр	Евгеньевич	Москва	pitbl@mail.ru	ИГЕМ РАН
4	Блохин	Павел	Анатолевич	Москва	blokhin@ibrae.ac.ru	ИБРАЭ РАН
5	Вознесенский	Евгений	Арнольдович	Москва	eugene@geoenv.ru	ИГЭ РАН
6	Гусева	Наталья	Владимировна	Томск	gusevanv@tpu.ru	НИ ТПУ
7	Зайцева	Татьяна	Сергеевна	Санкт-Петербург	z-t-s@mail.ru	ИГГД РАН
8	Морозов	Иван	Аркадьевич	Москва	ivan.morozov@yandex.ru	ИГЕМ РАН
9	Новикова	Людмила	Анатолевна	Воронеж	yonk@mail.ru	ВГЛТУ
10	Паниковровский	Тарас	Леонидович	Апатиты	t.panikorovskii@ksc.ru	ФИЦ КНЦ РАН
11	Рубан	Алексей	Сергеевич	Томск	ruban@tpu.ru	НИ ТПУ
12	Тарарушкин	Евгений	Викторович	Москва	evgeny.tararushkin@yandex.ru	НИУ ВШЭ
13	Тимофеева	Мария	Николаевна	Новосибирск	timofeeva@catalysis.ru	ИК СО РАН
14	Толпешта	Инна	Игоревна	Москва	itolp@soil.msu.ru	МГУ
15	Тюпина	Екатерина	Александровна	Москва	tk1972@mail.ru	РХТУ
16	Чернов	Михаил	Сергеевич	Москва	miha.chernov@ya.ru	МГУ
17	Шалдыбин	Михаил	Викторович	Томск	shaldybinmv@yandex.ru	ТомскНИПИнефть
18	Якич	Тамара	Юрьевна	Томск	yakichtu@tpu.ru	НИ ТПУ

СПИСОК ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ УЧАСТНИКОВ

	Фамилия	Имя	Отчество	Город	Эл. Почта	Название организации
1	Аксенов	Сергей	Михайлович	Апатиты	aks.crys@gmail.com	ФИЦ КНЦ РАН
2	Алексеев	Андрей	Александрович	Гатчина	andre_alekseev_2017@mail.ru	НИЦ «Курчатовский институт»
3	Вакалова	Татьяна	Викторовна	Томск	tvv@tpu.ru	НИ ТПУ
4	Вакуленко	Людмила		Новосибирск	vakylenkolg@ipgg.sbras.ru	ИНГГ СО РАН
5	Варламов	Евгений	Борисович	Москва	evgheni968@rambler.ru	ФГБНУ ФИЦ им. В.В. Докучаева
6	Габсалихова	Софья	Романовна	Бугульма	sof_gb@mail.ru	ТатНИПИнефть
7	Глушак	Артём	Андреевич	Москва	aaglushak@edu.hse.ru	НИУ ВШЭ
8	Грязнова	Дарья	Владимировна	Апатиты	daryamoskvina@mail.ru	ФИЦ КНЦ РАН
9	Деева	Елена	Сергеевна	Томск	shaldybinMV@tomsknipi.ru	ТомскНИПИнефть
10	Дребот	Валерия	Витальевна	Томск	drebotvv@ipgg.sbras.ru	ТФ ИНГГ СО РАН
11	Дягилев	Семен	Станиславович	Томск	shaldybinMV@tomsknipi.ru	ТомскНИПИнефть
12	Дякин	Павел	Васильевич	Санкт-Петербург	dyakin@mail.ru	ООО НВФ «Керамбет-Огнеупор»
13	Жуковская	Елена	Анатолевна	Сербия	zhukovskaia.ea@nis.rs	НТЦ НИС
14	Закусин	Сергей	Вячеславович	Москва	zakusinsergey@gmail.com	ИГЕМ РАН

Российская Группа по глинам и глинистым минералам – Russian Clay Group

	Фамилия	Имя	Отчество	Город	Эл. Почта	Название организации
15	Калашникова	Галина	Олеговна	Апатиты	g.kalashnikova@ksc.ru	ФИЦ КНЦ РАН
16	Канаки	Алексей	Владимирович	Томск	shaldybinMV@tomsknpi.ru	ТомскНИПИнефть
17	Карпенко	Федор	Сергеевич	Москва	kafs08@bk.ru	ИГЭ РАН
18	Ким	Ксения	Борисовна	Воронеж	kmkseniya@yandex.ru	ФГБОУ ВО "ВГУИТ"
19	Козлов	Павел	Павлович	Москва	kozlovpavel96@gmail.com	РХТУ им. Д.И. Менделеева
20	Королева	Татьяна	Александровна	Москва	tanakoro@yandex.ru	ИГЕМ РАН
21	Коршунов	Дмитрий	Михайлович	Москва	dmit0korsh@gmail.com	ГИН РАН
22	Кравченко	Ольга	Валерьевна	Петропавловск-Камчатский	kovina86@mail.ru	ИВиС ДВО РАН
23	Крот	Анна	Дмитриевна	Москва	anna.d.krot@gmail.com	МГУ им. М.В. Ломоносова
24	Кудрявцев	Андрей	Александрович	Санкт-Петербург	kudryavtsev.andrey@tescan.ru	ООО «ИНСКАН»
25	Кузьмук	Дарья	Алексеевна	Минск	dariakuzmuk@mail.ru	НУ «ОИЭЯИ – Сосны»
26	Курочкина	Ирина	Владимировна	Черногорск		ООО «Бентонит Хакасии»
27	Кутхуджина	Алина	Дмитриевна	Москва	kuthudzhinaad@my.msu.ru	МГУ
28	Лебедева	Анастасия	Михайловна	Москва	amlebedeva07@gmail.com	МГУ
29	Лойко	Сергей	Васильевич	Томск	s.loyko@yandex.ru	ТГУ
30	Меньшикова-Тонян	Ирина	Рубеновна	Москва	iton612@yandex.ru	МГУ

Российская Группа по глинам и глинистым минералам – Russian Clay Group

	Фамилия	Имя	Отчество	Город	Эл. Почта	Название организации
31	Мусаэлян	Роман	Эдуардович	Москва	romaniero1@gmail.com	Почвенный институт
32	Небера	Татьяна	Степановна	Томск		ТГУ
33	Нестеренко	Анастасия	Андреевна	Москва	555stasy@mail.ru	ИГЕМ РАН
34	Никулин	Иван	Иванович	Москва	iinikulin@gmail.com	ИГЕМ РАН
35	Павлова	Ирина	Аркадьевна	Екатеринбург	htko@yandex.ru	УрФУ
36	Павлюк	Александр	Олегович	Томск	pavlyuk17@tpu.ru	НИ ТПУ
37	Першина	Валерия	Руслановна	Бугульма	bikbaeva-lera@mail.ru	ТатНИПИнефть
38	Подковыров	Виктор	Николаевич	Санкт-Петербург	vpodk@mail.ru	ИГГД РАН
39	Пономарев	Олег	Борисович	Москва	ponomarevgeo@rambler.ru	ООО «ПроТех Инжиниринг»
40	Рощин	Марат	Олегович	Москва	roshchin2m8@gmail.com	ИГЕМ РАН
41	Румянцева	Наталья	Алексеевна	Москва	rumyancevanat@gmail.com	ООО «ПроТех Инжиниринг»
42	Рысин	Александр		Москва	aleksandr.rysin@pte.eurochem.ru	ООО «ПроТех Инжиниринг»
43	Рязанова	Елена	Ивановна	Москва	lenabutler@mail.ru	ООО «ПВП СНК»
44	Савичев	Олег	Геннадьевич	Томск	osavichev@mail.ru	НИ ТПУ
45	Селиверстов	Евгений	Сергеевич	Белгород	seliverstov.evgeniy.s@gmail.com	НИУ «БелГУ»
46	Семенов	Иван	Николаевич	Москва	semenkov@geogr.msu.ru	МГУ

Российская Группа по глинам и глинистым минералам – Russian Clay Group

	Фамилия	Имя	Отчество	Город	Эл. Почта	Название организации
47	Семин	Павел	Викторович	Москва	semin@bentonit.ru	ООО "Группа компаний Бентонит"
48	Сергеева	Анастасия	Валерьевна	Петропавловск-Камчатский	anastavalers@gmail.com	ИВиС ДВО РАН
49	Сеткова	Татьяна	Викторовна	Черноголовка	setkova@iem.ac.ru	ИЭМ РАН
50	Симаков	Артем	Алексеевич	Томск	simakov2001@bk.ru	НИ ТПУ
51	Слуковская	Марина	Вячеславовна	Апатиты	slukovskaya.mv@gmail.com	ФИЦ КНЦ РАН
52	Солотчин	Павел	Анатолевич	Новосибирск	paul@igm.nsc.ru	ИГМ СО РАН
53	Тукмачев	Данила	Вадимович	Томск	danilatukmachev@mail.ru	НИ ТПУ
54	Усманов	Рустем	Маратович	Казань	forstudentf@yandex.ru	КФУ
55	Хайданов	Илья	Владимирович	Тула	ikhaidanov@gmail.com	ТГПУ им. Л.Н. Толстого
56	Храмченков	Максим	Георгиевич	Москва	mkhramch@gmail.com	НИЦ «Курчатовский институт»
57	Шаповал	Андрей	Александрович	Москва	shapoval@bentopro.su	ООО «Бентопро»
58	Шашов	Олег	Евгеньевич	Томск	shashovoe@gmail.com	НИ ТПУ
59	Шентеряков	Владислав	Алексеевич	Санкт-Петербург	info@inscan.ru	ООО «ИНСКАН»

ГРУППА КОМПАНИЙ «БЕНТОНИТ»

Передовые технологии, высокие стандарты качества, непрерывное развитие научной базы и квалифицированные специалисты — ключевые факторы успеха Группы Компаний «Бентонит», лидирующей в сфере добычи и переработки бентонита в России и СНГ, а также входящей в ТОП-5 мировых производителей бентонита.

В структуре группы 13 производственных и торговых предприятий и 2 института, расположенных в России, Азербайджане и Казахстане.

Сырьевая база включает в себя 10 месторождений бентонитовых глин и 1 – известняка, суммарные запасы бентонита составляют 113 млн. т. Объем продаж бентопродукции превышает 800 тыс. т. в год. Для обеспечения добычи и переработки бентонита, которые возможны только в теплый период, запущены производственные мощности в 2 раза превышающие объемы продаж – 1,5 млн. т. продукции в год при круглогодичном режиме.



Рис. 1. Карьер ООО «Бентонит Хакасии» в Республике Хакасия

Холдинг постоянно инвестирует средства на научно-исследовательскую деятельность, за последние пять лет зарегистрировано 16 патентов на новые изобретения. Например, проводят исследования по новым направлениям: кислотно-активированный бентонит, применяемый для фильтрации пищевых и промышленных масел; применение бентонита в целлюлозно-бумажном и керамическом производстве; в лакокрасочных материалах на водной основе; в противопожарных литейных покрытиях и других направлениях.

Российские активы

Первое производственное предприятие ООО «Аргиллит» - было организовано в 1999 году в Республике Хакасия, на базе месторождения бентонитов «10-й Хутор». За два года были построены технологические линии по активации глины и производству глинопорошка, а в 2003 году организован уже второй завод по выпуску бентонитовых гранул. В 2014 году ООО «Аргиллит» объединился со своим конкурентом ОАО «Хакасский бентонит», разрабатывавшим другие пласты этого же месторождения, в результате чего появилось новое мощное предприятие - ООО «Бентонит Хакасии». Объединение позволило максимально оптимизировать переработку глины и производство продукции различных видов и модификаций. На сегодняшний день этому предприятию нет равных в СНГ по мощностям.



Рис. 2. Производство ООО «Бентонит Хакасии» в Республике Хакасия

В 2001 году было приобретено ОАО «Бентонит» (теперь ООО «Бентонит Кургана») в Курганской области, которое владело лицензией на право пользования недрами Зырянского месторождения, но не имело перерабатывающих мощностей. Холдинг в кратчайшие сроки построил завод с нулевого цикла - в мае 2002 г. был заложен первый фундамент, в ноябре 2003 г. уже выпускалась активированная глина, а в сентябре 2004 г. заработали линии по производству бентопорошков и гранул. Со временем компания запустила выпуск порошков для горизонтально-направленного бурения с повышенными технологическими свойствами, которые импортозаместили немецкую и греческую продукцию для Московского и Санкт-Петербургского метростроя. С использованием курганской глины были построены десятки тоннелей и станций метро.



Рис. 3. Производство ООО «Бентонит Кургана» в Курганской области

Стоит отметить, что процессы добычи и переработки бентонита имеют множество осложняющих факторов. Ещё на стадии разработки карьеров необходимо учитывать широкую номенклатуру бентонитовой продукции с разноплановыми требованиями к качеству. При этом добыча бентонитовых глин затруднена сложным геологическим строением месторождений, малой мощностью и высокой изменчивостью качества пластов. Поэтому на предприятиях ГК Бентонит еще до начала горных работ проводится детальное изучение месторождений, бентонит добывается исключительно селективным способом с распределением сырья по направлениям, а для обеспечения специфических требований каждого покупателя на всех производственных этапах проводится постоянный регламентированный контроль.

Ещё одно производство по переработке глины с одноименным названием ООО «Глинопереработка» организовали в Брянской области. Для этого был приобретен имущественный комплекс керамзитового завода, который за два года перепрофилировали под производство бентонитовых гранул. Завод стал базовым производственным предприятием направления зообизнеса, выпустив в 2005 году первые упаковки комкующихся наполнителей для туалета кошек.



Рис. 4. Завод ООО «Глинопереработка» в Брянской области

Для диверсификации бизнеса в 2006 году было приобретено ОАО «Ильский завод Утяжелитель — НПО «Бурение» (теперь АО «Краснодарский завод промышленных минералов», далее КЗПМ), история которого берет свое начало с середины 50-х годов прошлого столетия. В разные периоды предприятие выпускало утяжелители из железной руды, глинопорошки из местных глин для нефтяников Кубани, спеццементы для тампонажа высокотемпературных и сверхглубоких скважин, баритовый утяжелитель для буровых растворов. Силами Холдинга на заводе было запущено производство минерального порошка из карбонатных пород для автодорожного строительства, и известняковой муки для изготовления комбикормов.



Рис. 5. Завод ООО «КЗПМ» в Краснодарском крае

Зарубежные активы

Дальнейшее поступательное развитие требовало расширения сырьевой базы, поиска источников глинистого сырья с большим содержанием основного порообразующего минерала – монтмориллонита. Значимым для Группы Компаний Бентонит событием стало создание в 2006 году совместного предприятия ООО «АзРосПромИнвест» на базе Даш-Салахлинского месторождения природно-натриевого бентонита, с содержанием монтмориллонита до 85%. Холдинг в кратчайшие сроки и за свой счет приступил к проектированию и строительству завода по производству бентопорошка, и в 2007 году при участии Президента Азербайджана Ильхама Алиева и членов правительства состоялось его торжественное открытие.

Помимо прямых финансовых инвестиций в строительство завода, ГК «Бентонит» передала совместному предприятию объемы продаж на российском рынке, делилась с новым партнером научно-техническими разработками, активно проводила обучение местных специалистов.

В 2016 году сырьевая база ГК «Бентонит» пополнилась Таганским месторождением, расположенным в Казахстане. Глины данного месторождения уникальны, и по своим качественным характеристикам превосходят все мировые: имеют высочайшее содержание монтмориллонита до 80-98%, особую чистоту, превосходные сорбирующие, связующие и реологические характеристики. Вошедшее в структуру Холдинга ТОО «Алтайские минералы» (ныне ТОО «Тагбент») получило свое активное развитие - были построены технологическая линия активации, сушильно-помольный комплекс для производства бентопорошков.



*Рис. 6. Технологическая линия и помольный комплекс
ТОО «Тагбент» в Казахстане*

МЕСТОРОЖДЕНИЯ

ГК «Бентонит» имеет лицензии на разработку 10 месторождений бентонитовых глин



Регион	Названия месторождений	Запасы млн. тн.	Содержание монтмориллонита
Республика Хакасия	10 -й Хутор	25	до 75%
	Бентойское		
	Карасукское		
	Солнечное		
Курганская область	Каратигейское	24	до 70%
	Заячий Лог		
	Зырянское		
Республика Азербайджан	Измайловское	22	до 85%
Республика Казахстан	Даш-Салахлинское	9	до 96%
	Таганское		

Суммарные запасы составляют **80 млн. тонн**. При текущем уровне добычи это гарантирует около 100 лет эксплуатационного периода. Кроме того, постоянно ведутся геологоразведочные работы по расширению сырьевой базы. Стоит отметить, что «Даш-Салахлинское» месторождение имеет один из лучших в мире природно-натриевый бентонит. «Таганское» месторождение по качеству бентонита не уступает лучшим мировым аналогам, а по некоторым показателям их превосходит.

Химический состав бентонитовых глин месторождений ГК «Бентонит» (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	ППП
«10-й Хутор», Бентойское», «Карасукское», «Солнечное», «Каратигейское», «Заячий Лог»	59,7	18,63	3,93	0,7	0,59	2,76	2,43	0,12	0,2	1,6	0,98	8,38
«Зырянское», «Измайловское»	57,4	19,4	5,97	0,9	0,15	1,81	3,01	0,04	0,1	1	0,78	9,4
«Даш-Салахлинское»	58,6	13,4	4,7	0,2	0,39	2,05	2,3	0,11	0,2	0,4	2,3	15,3
«Таганское»	56,0	19,0	4,4	-	0,3	2,0	2,2	0,02	0,08	0,2	1,4	14,4



IQSCAN W21



Приглашаем Вас на бесплатное тестирование оборудования:

- Санкт-Петербург, 2й Муринский проспект 36 (м. Площадь Мужества)
- Москва, Денисовский переулок 26 (м. Бауманская)

+7 812 220 20 80, info@inscan.ru

ООО «ИНСКАН»



IQSCAN F50



Приглашаем Вас на бесплатное тестирование оборудования:

- Санкт-Петербург, 2й Муринский проспект 36 (м. Площадь Мужества)
- Москва, Денисовский переулок 26 (м. Бауманская)

+7 812 220 20 80, info@inscan.ru

ООО «ИНСКАН»



IQSCAN FIB



Приглашаем Вас на бесплатное тестирование оборудования:

- Санкт-Петербург, 2й Муринский проспект 36 (м. Площадь Мужества)
- Москва, Денисовский переулок 26 (м. Бауманская)

+7 812 220 20 80, info@inscan.ru

ООО «ИНСКАН»

Научное издание

Глины и глинистые минералы – 2025:

**VII РОССИЙСКОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ГЛИНАМ И ГЛИНИСТЫМ МИНЕРАЛАМ
«ГЛИНЫ-2025».**

ТОМСК, 8-12 СЕНТЯБРЯ 2025 г. МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ.

Российская группа по глинам и глинистым минералам;
Коллектив авторов

www.ruclay.com

Глины и глинистые минералы - 2025. VII Российское Собрание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2025». Томск, 8-12 июня 2025 г. Материалы докладов.
М.: ИГЕМ РАН, 2025. 194 с.

Редакция и дизайн издания: М.А. Рудмин, А.Н. Николаева, Т.А. Королева, В.В. Крупская.

ISBN 978-5-88918-082-1



Подписано к печати: 04.09.2025.
Формат 60×90/16. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Уч. изд. л. 12.125
Тираж 300 экз. Заказ №

Отпечатано в Издательство «Томский политехнический университет»
634050, Томск, ул. Ленина 30, 1 этаж.
e-mail: amp@tpu.ru, www.portal.tpu.ru/publish