

УДК 551.7, 551.8
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4910
Шифр специальности ВАК: 1.6.14, 1.6.10
Научная статья



Палеофациальные условия образования месторождений бентонитовых глин на территории Российской Федерации

П.Е. Белоусов[✉], В.В. Крупская, А.О. Румянцева, Т.А. Королева, С.В. Закусин

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук, Россия, г. Москва*

[✉]belousov.peter@list.ru

Аннотация. *Актуальность* работы связана с необходимостью развития минерально-сырьевой базы месторождений высококачественного бентонита на территории России, а также с изучением основных бентонитоносных провинций, этапов их образования и соответствующих благоприятных обстановок. *Целью* работы является систематизация имеющихся в собственной коллекции и опубликованных ранее данных по месторождениям бентонитовой глины различного возраста на территории России, выделение благоприятных геологических и палеофациальных обстановок образования месторождений бентонитовых глин, а также наиболее перспективных районов на поиски новых и доизучение имеющихся месторождений. *Методы:* палеофациальный анализ, рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализ. *Результаты.* В фанерозое на территории современной России проходило несколько наиболее активных геологических этапов бентонитообразования, включающих нижне-каменноугольный, среднеюрский, меловой, палеогеновый и неогеновый периоды. По условиям образования месторождения бентонитовых глин относятся к вулканогенно-осадочному, гидротермальному и осадочному типам. Образование месторождений вулканогенно-осадочного генезиса связано с проявлением вулканической деятельности в пределах активных континентальных окраин и прилегающих к ним краевых частей платформ в эпоху активного вулканизма в каменноугольном, юрском, меловом, палеогеновом и неогеновом периодах. Пепловый материал накапливался в прибрежных участках морских акваторий – лагунах, заливах и мелководных приливно-отливных зонах, а также пресных озерах. Месторождения гидротермального типа образовывались за счет гидротермального преобразования туфов и пеплов в основном в палеогеновый период. Бентонитовые глины осадочного генезиса образовывались за счет вымывания и переноса первичного глинистого материала из зон выветривания континентальных участков только в меловом, палеогеновом и неогеновом периодах. К наиболее перспективным регионам для дальнейших поисков и разведки месторождений высококачественных бентонитов относятся провинции каменноугольного возраста Сибири, а также провинции юрского, палеогенового и неогенового возраста Дальнего Востока, включая Приморский край и о. Сахалин, где бентонитовые глины имеют вулканогенно-осадочный и гидротермальный генезис.

Ключевые слова: бентонит, природные сорбенты, геологические провинции, палеофациальный анализ, минерально-сырьевая база, вулканизм

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-77-10050, работы по изучению палеофациальных условий образования бентонитов республики Кабардино-Балкария, а также республики Хакасия и Сахалинской области выполнены по базовой теме ИГЕМ РАН.

Для цитирования: Палеофациальные условия образования месторождений бентонитовых глин на территории Российской Федерации / П.Е. Белоусов, В.В. Крупская, А.О. Румянцева, Т.А. Королева, С.В. Закусин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 50–66. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4910

UDC 551.7, 551.8
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4910
Scientific paper



Paleofacies conditions of bentonite clay deposits formation on the territory of the Russian Federation

P.E. Belousov[✉], V.V. Krupskaya, A.O. Rumyantseva, T.A. Koroleva, S.V. Zakusin

*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

[✉]belousov.peter@list.ru

Abstract. Relevance. The need to develop the mineral resource base of high-quality bentonite deposits of Russia, as well as to study the main bentonite-bearing provinces, the stages of their formation and favorable conditions. **Aim.** To systematize the data available in own collection and previously published data on bentonite clay deposits of various ages in Russia, to identify favorable geological and paleofacies environments for the formation of bentonite clay deposits, as well as the most promising areas for the search for new and further study of existing deposits. **Methods.** Paleofacies analysis, X-ray phase and X-ray fluorescence analysis. **Results.** In the Phanerozoic age on the territory of modern Russia there were several most active geological stages of bentonite formation, including the Lower Carboniferous, Middle Jurassic, Cretaceous, Paleogene and Neogene periods. According to the conditions of formation, bentonite clays belong to the volcanogenic-sedimentary, hydrothermal and sedimentary types. Formation of deposits of volcanogenic-sedimentary genesis is associated with the presence of volcanic activity within active continental margins and adjacent marginal parts of platforms during the era of active volcanism in the Carboniferous, Jurassic, Cretaceous, Paleogene and Neogene periods. Ash material was accumulated in coastal sea waters – marine lagoons, bays, shallow tidal zones and freshwater lakes. Hydrothermal deposits were formed due to hydrothermal transformation of tuffs and ashes mainly in the Paleogene period. Bentonite clays of sedimentary genesis were formed due to washing out and transfer of primary clay material from weathering zones of continental areas only in the Cretaceous, Paleogene and Neogene periods. The most promising regions for further exploration and development of high-quality bentonite deposits include the Carboniferous provinces of Siberia, as well as the Jurassic, Paleogene and Neogene provinces of the Far East, including Primorsky Krai and Sakhalin Island, where bentonite clays have a volcanogenic-sedimentary and hydrothermal genesis.

Keywords: bentonite, natural sorbents, geological provinces, paleofacies analysis, mineral resource base, volcanism

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-77-10050, the work on studying the paleofacies conditions of bentonite formation in the Republic of Kabardino-Balkaria, the Republic of Khakassia and Sakhalin Region, carried out within the framework of the basic theme of IGEM RAS.

For citation: Belousov P.E., Krupskaya V.V., Rumyantseva A.O., Koroleva T.A., Zakusin S.V. Paleofacies conditions of bentonite clay deposits formation on the territory of the Russian Federation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 50–66. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4910

Введение

Термин «бентониты, бентонитовые глины» относится к глинистым породам с содержанием минералов группы смектита более 50–60 %. Для них характерны такие свойства, как набухание, высокая коллоидальность и сорбционная способность, а также низкая водопроницаемость и другие свойства, которые обеспечиваются за счет преобладания в их составе смектита.

Смектиты представляют собой гидратированные алюмосиликаты, состоящие из двух сеток кремнекислородных тетраэдров и расположенной между ними одной сетки алюмогидроксильных октаэдров, образующих слой 2:1. Благодаря изоморфным замещениям формируется отрицатель-

ный заряд слоя, который компенсируется межслоевыми катионами и обеспечивает высокие сорбционные свойства и набухаемость бентонитовых глин [1, 2]. Для монтмориллонита характерна преимущественная локализация заряда в составе октаэдрических сеток, что приводит к наиболее высоким показателям технологических свойств бентонитов.

Формирование большинства месторождений высококачественного бентонита связано с вулканизмом и разложением вулканогенных пород (туфов, туффигов, пеплов, порфиригов и т. п.) под действием слабощелочных морских вод и гидротерм. Рассматривая геолого-структурные обстановки, можно выделить основные типы районов образования бентонитовых глин: активные континен-

тальные окраины складчатых областей, краевые части платформ в эпоху активного вулканизма (вулканогенный тип) и краевые части платформ в эпоху стабилизации тектонических движений (осадочный тип месторождений) [3–5].

Данная работа написана как на основании полевых работ на месторождениях бентонитовой глины с участием авторов статьи (месторождения и проявления Поронайского района о. Сахалин, проявления южной части Приморского края, месторождения Южно-Минусинской впадины республики Хакасия, месторождения и проявления Центральной России), так и на основании обширной коллекции из различных месторождений и опубликованной литературы. Образцы из собственной коллекции изучались по стандартной процедуре с использованием методов рентгенофазового, рентгенофлуоресцентного и термического анализа, инфракрасной спектроскопии, измерялась емкость катионного обмена, величина удельной поверхности и микропористости, проводились микроскопические исследования.

Генетические типы месторождений бентонитовых глин

В соответствии с классической российской классификацией выделяют четыре основных генетических типа месторождений бентонитовых глин: вулканогенно-осадочные, гидротермальные, осадочные и элювиальные (остаточные) [6, 7].

Для бентонитов *вулканогенно-осадочного* типа характерно высокое качество сырья и пластообразная форма залегания толщи. Они формируются путем подводного преобразования вулканических пеплов [3, 8] в слабощелочных условиях прибрежных частей морей, заливах, лагунах и озерах с повышенной соленостью. В более ранних работах считалось, что состав обменного комплекса минералов бентонитовой глины зависит от типа водоема, в котором осаждался пепловый материал. Однако изучение бентонитовых месторождений о. Сахалин и Приморского края показало, что тип бентонита зачастую обусловлен вторичными изменениями, например, влиянием подземных вод, о чем свидетельствует вертикальная зональность бентонитовых залежей. Так, на некоторых месторождениях на глубине ниже уровня грунтовых вод фиксируется постепенный переход от щелочноземельных к щелочным разностям бентонита [9]. Схожая ситуация отмечена и на большинстве разрабатываемых месторождений Японии [10]. Одним из явных диагностических признаков вулканогенно-осадочных бентонитов является присутствие реликтов пористого вулканического стекла, которое не полностью изменилось до смектита [5, 10].

Зачастую бентонитоносные провинции вулканогенно-осадочного генезиса пространственно и ге-

нетически связаны с угольными бассейнами. Связь между месторождениями бентонитовых глин и угленосными отложениями объясняется тем, что условия осадконакопления ископаемых углей благоприятны для формирования бентонитовых залежей в морских прибрежных зонах мелководья, лагунах, заливах и озерах. Процессы накопления органических остатков прерываются в результате осаждения пеплов. Таким образом, прослеживается ритмичное переслаивание пластов угля и бентонитовой глины [11–14]. В случае значительного преобладания объема осевшего пеплового материала над объемом органического вещества рН среды соответствует исходным морским водам и образуются смектиты. В случае преобладания органических остатков над объемом пеплового материала рН системы опускается ниже нейтральных значений и образуются тонштейны каолинитового состава [15]. Можно заключить, что наличие вулканизма в регионе и широкое развитие угольных бассейнов потенциально благоприятно для формирования вулканогенно-осадочных бентонитоносных провинций. Примерами таких провинций могут служить о. Сахалин (Тихменевское месторождение), Приморский и Хабаровский край, а также республика Хакасия [7, 9, 14, 16–19].

Вулканогенно-осадочные месторождения связаны со складчатыми поясами и предгорными прогибами (окайно-континентальные орогены и прилегающие к ним краевые части платформ на морском шельфе и озерах вулканических областей) в период активного вулканизма.

Гидротермальные месторождения бентонита связаны с разломами, трещиноватыми вулканогенными породами [3, 20]. Бентонитовые тела в этих месторождениях секут вмещающие породы, имеют штокообразную, дайкообразную и пластообразную форму и обычно большую мощность. Бентониты в этих условиях образуются за счет гидротермального преобразования вулканических пород [20].

Разнообразие образующихся бентонитов по составу и свойствам и содержание в них сопутствующих компонентов зависят от температуры, состава и щелочности термальных вод. Благоприятные условия для преобразования туфов в смектит создаются при низких (50–200 °С) и средних (200–300 °С) температурах гидротерм и их высокой щелочности (рН 9–10) [3]. Отличительной чертой бентонитов гидротермального генезиса является наличие постепенных переходов: бентонит ↔ смектизированная порода ↔ материнская порода. Также диагностическим признаком является наличие поблизости вулканогенных пород различного состава (преимущественно кислого) [5].

Месторождения гидротермального типа приурочены к окайно-континентальным орогенам с

зонами глубоких разломов, на краях континентальных блоков в эпоху активизации гидротермальных процессов в зонах активного вулканизма [3]. На данный момент в России не разрабатывается ни одного месторождения бентонита гидротермального типа, однако предполагается, что в основном они локализованы в Приморском крае [5].

Процесс образования осадочных бентонитов включает в себя вымывание и перенос первичного глинистого материала из зон выветривания континентальных участков, и переотложение в бассейны седиментации. Источником смектита могут быть как остаточные месторождения, так и вулканогенно-осадочные, подвергшиеся эрозии и размыву. Осажденный в озерах и внутриконтинентальных бассейнах материал подвергается уплотнению на ранней стадии диагенеза.

Остаточный тип (элювиальный) бентонитов связан с корами выветривания и определяется в основном тремя факторами: составом первичных (материнских) пород, климатом и тектоникой. Тектоника региона определяет рельеф, глубину профиля выветривания и возможность образования коры выветривания. Остаточные месторождения бентонита формировались в условиях развития платформ в окраинных частях кратонов и окраин-

но-континентальных орогенов, в период стабилизации тектонических движений [3]. Крупных месторождений и проявлений данного типа на территории Российской Федерации не выявлено.

Благоприятные периоды и обстановки бентонитообразования

Рассматривая возраст месторождений бентонитовой глины РФ (табл. 1), можно выделить несколько наиболее активных геологических этапов бентонитообразования. В первую очередь они связаны с наличием вулканической деятельности вблизи бассейнов седиментации с благоприятными обстановками – морских лагун, заливов и прибрежных мелководных приливно-отливных зон, возможно, пресных озер. Выделяются нижнекаменноугольный, среднеюрский, меловой, палеогеновый и неогеновые этапы. Стоит отметить, что кроме месторождений и проявлений, поставленных на баланс, существует несколько десятков прочих месторождений, в некоторых случаях также формирующих бентонитоносные провинции. С учетом этих месторождений и проявлений можно сказать, что наиболее благоприятными периодами бентонитообразования являются каменноугольный, меловой, палеогеновый и неогеновый.

Таблица 1. Основные этапы бентонитоносности со списком месторождений, поставленных на государственный баланс*
Table 1. Main stages of bentonite content with a list of deposits included in the state balance*

Месторождение Deposit	Географическое положение Geographical location	Тип, генезис Type, genesis	Возраст Age	Запасы A+B+C ₁ млн т Inventories A+B+C ₁ million tons*	Геотектоническая позиция Geotectonic position
Неогеновый период/Neogene period					
Черноморское Chernomorskoe	Краснодарский край Krasnodar region	Информация отсутствует No information	N ₂	5,9	Предкавказский краевой прогиб Pre-Caucasian foredeep
Активное, Желтое, Саринское, Соболевское Aktivnoe, Zheltoe, Sarinskoe, Sobolevskoe	Оренбургская обл. Orenburg region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	N ₂	33,1	Предуральский краевой прогиб Pre-Ural marginal depression
Биклянское, Березовское Biklyanskoe, Berezovskoe	респ. Татарстан Republic of Tatarstan	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	N ₂	37,9	Волго-Уральская антеклиз Volga-Ural anticline
Тихменевское Tikhmenevskoe	Сахалинская обл. Sakhalin region	Щелочной, вулканогенно-осадочный Alkaline, volcanogenic-sedimentary	N ₁	C ₂ – 0,7	Центрально-Сахалинская впадина Central Sakhalin Depression
Любинское Lyubinskoe	Омская обл. Omsk region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	N ₁	20,3	Ишимско-Иртышская моноклиза Ishim-Irtysh monocline
Зырянское Zyryanskoe	Курганская обл. Kurgan region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	N ₁	14	Зауральское поднятие Trans-Ural uplift
Палеогеновый период/Paleogene period					
Тарасовское Tarasovskoe	Ростовская обл. Rostov region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	P ₂	5,1	Воронежская антеклиз Voronezh anticline
Участок Самаринский Uchastok Samarinsky	Белгородская обл. Belgorod region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	P ₂	C ₂ – 4	Воронежская антеклиз Voronezh anticline
Южно-Тарасовское Yuzhno-Tarasovskoe	Ростовская обл. Rostov region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	P ₂	3,1	Воронежская антеклиз Voronezh anticline

Зеркальное Zerkalnoe	Приморский край Primorsky Krai	Щелочноземельный, гидротермальный Alkaline-earth, hydrothermal	Р ₁	0,1	Сихотэ-Алинская складчатая область Sikhote-Alin folded region
Герпегезское Gerpegezhskoe	респ. Кабардино- Балкария Republic of Kabardino- Balkaria	Щелочной, щелочноземельный, осадочный Alkaline, alkaline-earth, sedimentary	Р ₁	8,1	Предкавказский краевой прогиб Pre-Caucasian foredeep
Никольское, Майдан-Бентонитовое Nikolskoe, Maydan-Bentonitovoe	Воронежская обл. Voronezh region	Щелочно-земельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	Р ₁	1	Воронежская антеклиза Voronezh antecline
Нальчинское, Хеу Nalchinskoe, Kheu	респ. Кабардино- Балкария rep. Kabardino- Balkaria	Щелочной, щелочноземельный, вулканогенно-осадочный Alkaline, alkaline-earth, volcanogenic-sedimentary	Р ₁	6,6	Предкавказский краевой прогиб Pre-Caucasian foredeep
Меловой период/Cretaceous period					
Ижбердинское, Сарайбашское Izhberdinskoe, Saraybashskoe	Оренбургская обл. Orenburg region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	К ₂	7	Предуральский краевой прогиб Pre-Ural marginal depression
Кудринское, Курцовское Kudrinskoe, Kurtsovskoe	респ. Крым Republic of Crimea	Щелочной, щелочноземельный, вулканогенно-осадочный Alkaline, alkaline-earth volcanogenic-sedimentary	К ₂	0,4	Горно-Крымское складчато- надвиговое сооружение Mountainous Crimean fold-thrust structure
Участок Вьюжный-2 Uchastok Vyuzhny-2	Оренбургская обл. Orenburg region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	К ₂	6,4	Предуральский краевой прогиб Pre-Ural marginal depression
Харанорское Kharanorskoe	Забайкальский край Transbaikali Territory	Щелочноземельный, вулканогенно-осадочный Alkaline-earth, volcanogenic-sedimentary	К ₁	8,4	Монголо-Охотская складчатая область Mongol-Okhotsk folded region
Ургальское Urgalskoe	Хабаровский край Khabarovsk Krai	Щелочноземельный, вулканоген- но-осадочный Alkaline-earth, volcanogenic- sedimentary	К ₁	0,3	Сихотэ-Алинская складчатая область Sikhote-Alin folded region
Юрский период/Jurassic period					
Васильевское, Чернохолуницкое Vasilevskoe, Chernokholunitskoe	Кировская обл. Kirov region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	Ј ₂	С ₂ – 4,8	Волго-Уральская антеклиза Volga-Ural antecline
Каменноугольный период/Carboniferous period					
Калиново-Дашковское Kalinovo-Dashkovskoe	Московская обл. Moscow region	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	С ₁	1,9	Московская синеклиза Moscow Synecline
Камалинское Kamalinskoe	Красноярская обл. Krasnoyarsk region	Щелочноземельный, вулканогенно-осадочное Alkaline-earth, volcanogenic-sedimentary	С ₁	15,2	Алтае-Саянская складчатая область Altai-Sayan folded region
Бадьинское Badinskoe	респ. Коми Komi Republic	Щелочноземельный, осадочный Alkaline-earth, sedimentary	С ₁	2,4	Предуральский краевой прогиб Pre-Ural marginal depression
Каратигейское, Солнечное Karatigeykskoe, Solnechnoe	респ. Хакасия Republic of Khakassia	Щелочноземельный, вулканогенно-осадочный Alkaline-earth, volcanogenic-sedimentary	С _{1-2sr}	3	Алтае-Саянская складчатая область Altai-Sayan folded region
10-й Хутор 10 Khutor	респ. Хакасия Republic of Khakassia	Щелочноземельный, вулканогенно-осадочный Alkaline-earth, volcanogenic-sedimentary	С _{1-2sr}	1,5	Алтае-Саянская складчатая область Altai-Sayan folded region

*Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации, 2019 [21].

*State balance of mineral reserves of the Russian Federation. Bentonite Clays, 2019 [21].

Каменноугольный период

Имеющиеся данные по месторождениям бентонита мира позволяют заключить, что столь древний возраст порядка 358–298 млн лет не характерен для бентонитов и они имеют ограниченное распространение. Связано это с тем, что в результате глубокой стадии катагенеза и начальной стадии метаморфизма, что не

является редкостью для каменноугольных отложений, бентонитовые глины теряют свою способность к набуханию и переходят в аргиллиты [22].

Рассматривая месторождения каменноугольного возраста России, можно выделить две наиболее крупные провинции – Центральную и Сибирскую (рис. 1, а, б).

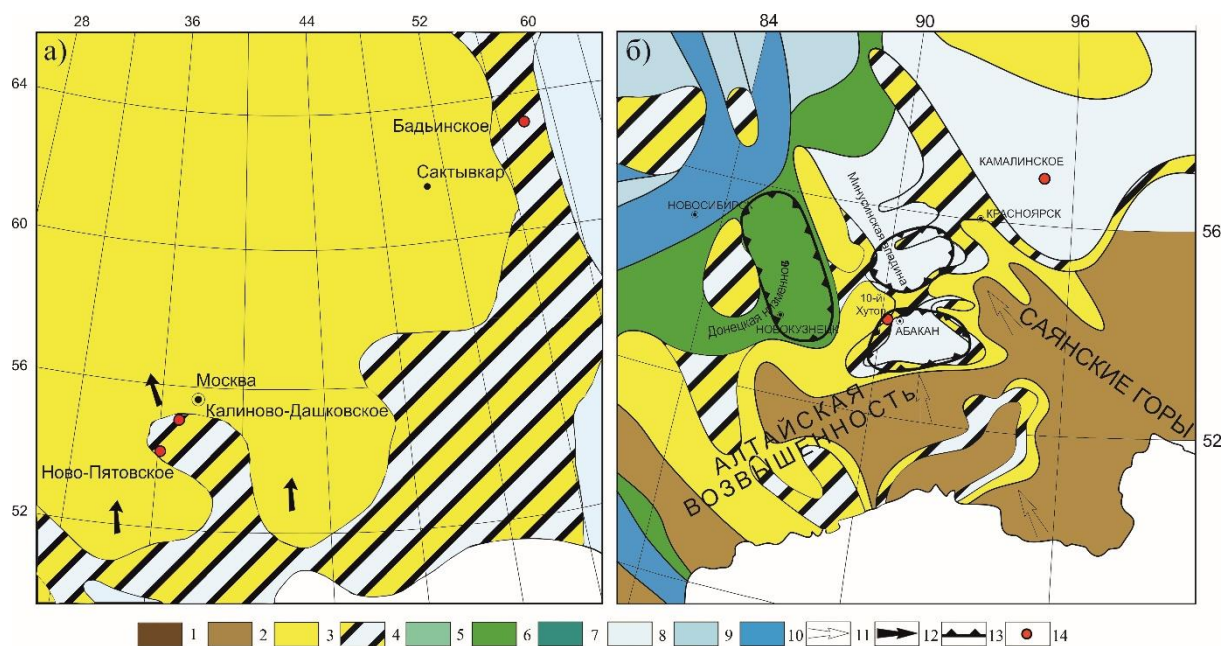


Рис. 1. Палеогеографическая схема (А.П. Виноградов [24], с упрощениями и дополнениями). Условные обозначения относятся ко всем нижерасположенным палеокартам: а) ранний каменноугольный период, ранневизейский ярус; б) нижний-средний каменноугольный период, серпуховский-башкирский ярус. Условные обозначения: 1 – горы высокие; 2 – горная суша; 3 – суша; 4 – прибрежные равнины, временами заливаемые морем; 5 – равнина низменная, аккумулятивная; 6 – озера и пресные болота; 7 – долины рек, аллювиальные равнины; 8 – зона мелководья, внутренние моря, заливы, лагуны, озера; 9 – мелководная часть шельфа; 10 – море и глубоководная часть шельфа; 11 – направление сноса терригенного материала; 12 – направление трансгрессии моря; 13 – зоны угленакопления; 14 – месторождения и проявления бентонитовой глины

Fig. 1. Paleogeographic scheme (A.P. Vinogradov [24], with simplifications and additions). The legend applies to all paleomaps below: а) Early Carboniferous period, Early Visean stage; б) Lower-Middle Carboniferous period, Serpukhovian-Bashkirian stage. Legend: 1 – high mountains; 2 – mountainous land; 3 – land; 4 – coastal plains, occasionally flooded by the sea; 5 – low-lying, accumulative plain; 6 – lakes and freshwater swamps; 7 – river valleys, alluvial plains; 8 – shallow water zone, inland seas, bays and lagoons, lakes; 9 – shallow part of the shelf; 10 – sea and deep-water part of the shelf; 11 – direction of terrigenous material removal; 12 – direction of sea transgression; 13 – coal accumulation zones; 14 – deposits and manifestations of bentonite clay

Месторождения Центральной провинции в основном представлены в Серпуховской и Калужской областях и приурочены к Московской синеклизе. Зачастую глины имеют черный оттенок, что связано с примесью органического вещества. Данные глины имеют невысокие показатели набухания и используются в промышленности после дополнительной активации и полимерных добавок. Наиболее изученным является Калиново-Дашковское месторождение, расположенное в Серпуховской области. На данный момент месторождение практически отработано.

В республике Саха расположено Бадьинское месторождение каменноугольного возраста, разработка на нем не ведется.

Как видно из палеогеографических карт (рис. 1, а), отложения бентонитовой глины образовывались в прибрежной мелководной зоне в период трансгрессии моря. Источником пеплов для каменноугольных месторождений центрального региона, вероятно, послужили вулканические центры, располо-

женные на территории современной юго-западной Германии, Предкавказья и Северного Кавказа, для Бадьинского месторождения – на восточном склоне Урала [23].

В восточной Сибири расположено Камалинское месторождение бентонитовой глины (рис. 1), в Рыбинском районе Красноярского края, в 180 км на восток от краевого центра – г. Красноярска. Район Камалинского месторождения глин приурочен к юго-западной окраине Сибирской платформы в пределах сочленения Рыбинской впадины со складчатыми докембрийскими сооружениями Енисейского кряжа. В пределах района под четвертичными отложениями залегают архейские, палеозойские и мезозойские образования.

В геологическом строении Камалинского месторождения принимают участие осадочные отложения чаргинской и краснегорьевской свит нижнего карбона, а также камалинской свиты средней юры. Камалинское месторождение приурочено к отложениям краснегорьевской свиты нижнего карбона.

Тело полезного ископаемого представляет собой пласт мощностью от 2 до 20 м, средняя мощность 9,13 м.

По преобладанию породообразующих минералов и гранулометрическому составу на Камалинском месторождении выделяется два типа полезного ископаемого – глины смектитовые коллоидные (бентонит восковидный) и глины каолинит-иллит-смектитовые алевритовые, которые визуально легко различаются между собой [25].

Основной проблемой при освоении данного месторождения является сложное геологическое строение, большая мощность вскрыши и неравномерное распределение полезного компонента. Высококачественные восковидные глины диагностируются тяжело, имеют крайне неравномерное распространение, залегают чаще всего на глубинах, превышающих 20 м, в виде линз и прослоев, не достигающих промышленных мощностей, что ограничивает их добычу и применение.

Одна из крупнейших бентонитовых провинций каменноугольного возраста находится на территории республики Хакасия. Здесь месторождения и проявления бентонита приурочены к Южно-Минусинской впадине, в частности к Черногорской и Изыхской мульдам. Бентонитовая формация связана с угольными и туфо-терригенными отложениями сарской свиты нижнего карбона. Отложение пеплового материала происходило в лагунной обстановке. Всего в данной провинции насчитывается шесть месторождений и проявлений бентонитовой глины с общими запасами порядка 15,6 млн т: 10-й Хутор, Бентойское, Каратигейское, Солнечное, Карасукское и Кайбалское. Добыча ведется на месторождении 10-й Хутор, на Солнечном и Каратигейском месторождениях ведется подготовка к освоению.

Источники вулканических пеплов в Минусинской котловине достоверно не идентифицированы. В.М. Богомазов [26] предположил, что центры вулканических извержений в раннем и среднем карбоне располагались на западе и северо-западе Алтае-Саянского орогенного пояса. В то же время С.И. Арбузов и соавт. [27] предположили, что источник мог находиться на юге региона, на территории современной Монголии или Забайкалья.

Рассмотрим краткое геологическое строение на примере месторождений 10-й Хутор и Карасукское.

Месторождение 10-й Хутор находится в 8 км юго-западнее города Черногорска Усть-Абаканского района республики Хакасия (рис 1). На месторождении разведано пять промышленных пластов бентонитовых глин. Наибольший интерес представляют слои IV, V и VI бентонита, которые используются в различных промышленных целях и характеризуются наиболее высоким качеством сырья и высоким содержанием смектита (табл. 2).

Бентонитовый пласт III в районе месторождения не представлен (рис. 2). Пласты имеют моноклиналиное падение на юго-восток под углом 6–8°. Месторождение разведано на глубину 25–30 м, при этом протяженность пластов по падению составляет 100–125 м. Мощность продуктивных пластов колеблется от 1 до 5 м, по простиранию пласты месторождения прослежены на 4 км. Пласты бентонитовых глин приурочены к сарской свите.

Месторождение разрабатывается двумя карьерами – Северо-Восточным и Юго-Западным. Северо-Восточный карьер вскрывает IV, V и VI пласты бентонита, Юго-Западный – только V и VI.

Кроме смектита, содержание которого колеблется в среднем от 56 до 65 % (в редких случаях до 75 %) в породах содержится иллит, каолинит, калиевые полевые шпаты, кварц, кальцит и сидерит. Бентонитовые глины месторождения относятся к щелочноземельному типу. Емкость катионного обмена составляет 53–62 мг*экв/100 г (табл. 2).

Карасукское месторождение находится в 5 км к северо-востоку от месторождения 10-й Хутор. В пределах месторождения вскрыты II, IV и VI продуктивные пласты бентонита. Месторождение не разрабатывается, находится на стадии геологического изучения. Для пластов VI и VI содержание смектита составляет 53–59 %, емкость катионного обмена 50–60 мг*экв/100 г. Среднее содержание смектита в подстилающем пласте II составляет 51 %, емкость катионного обмена – 49 мг*экв/100 г.

Таблица 2. Усредненные показатели минерального состава и свойств бентонитов месторождений Южно-Минусинской впадины (респ. Хакасия)

Table 2. Average indicators of the mineral composition and the quality of bentonite deposits of the South Minusinsk Depression (Republic of Khakassia)

Месторождение Deposit	Пласт/Plast	Смектит Smectite	Каолинит, иллит Kaolinite, Ilite,	Карбонаты Carbonates	Водоотдача, мл Water loss, ml	Емкость катионного обмена, мг*экв/100 г Cation exchange capacity, mg*eq/100 g	Индекс набухания, 2 г/мл Swelling index, 2 g/ml
		%					
Карасукское Karasukskoe	VI	52,9	9,2	3,6	н.о. n.f.	50,4	14,0
	IV	59,0	9,7	3,9		59,7	18,1
	II	51,3	6,9	2,0		48,9	13,9
10-й Хутор СВ 10H NE	VI	65,7	9,2	0,8	58,7	47,8	11,0
	V	56,0	5,9	1,4	64,3	52,7	10,4
	IV	64,5	4,8	2,6	56,3	60,7	11,2
10-й Хутор ЮЗ 10H SW	VI	66,7	7,3	3,0	61,14	54,8	13,4
	V	63,7	5,6	2,0	38,57	61,7	16,2

н.о. – не определялась из-за малого количества образца, отобранного из керна.

n.f. – was not determined due to the small amount of sample, taken from the core.

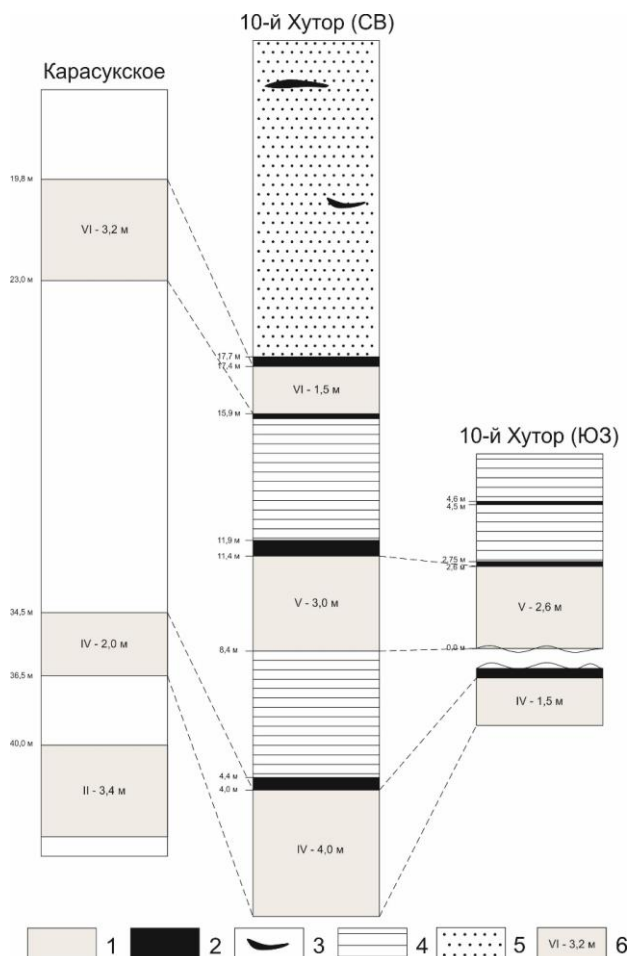


Рис. 2. Литологические колонки Карасукского месторождения, а также Юго-Западного и Северо-Восточного участков месторождения 10-й Хутор: 1 – бентонитовая глина; 2 – уголь; 3 – линзы углей; 4 – аргиллит; 5 – песчаник; 6 – номер пласта и его мощность

Fig. 2. Lithological columns of the Karasuk deposit, as well as the Southwestern and Northeastern sections of the 10 Khutor deposit: 1 – bentonite clay; 2 – coal; 3 – coal lenses; 4 – argillite; 5 – sandstone; 6 – seam number and its thickness

Юрский период

Бентонитовые глины юрского возраста имеют ограниченное распространение и расположены в Кировской области, где проводились поисковые работы на Омутнинской перспективной площади. Были выделены «Чернохолуницкий», «Васильевский», «Лесоучасток 16 км» участки и участок на «Рудничной перспективной площади». В результате проведенных работ на баланс были поставлены два месторождения бентонитовых глин – Чернохолуницкое и Васильевское, с суммарными запасами категории С₂ порядка 4,9 млн т.

Бентонитовые глины залегают в кровле омутнинской толщи байос-батских отложений средней юры. Мощность полезной толщи на Чернохолу-

ницком месторождении составляет 2,1–2,6 м. Мощности вскрыши колеблется от 4 до 10 м. Мощность полезной толщи Васильевского месторождения составляет порядка 3,7 м, вскрыши – 6–7 м. Залежи глин частично обводнены. Бентонитовые глины образовывались в лагунных условиях (рис. 3) и, по-видимому, имеют вулканогенно-осадочный генезис. На данный момент описываемые месторождения не разрабатываются.

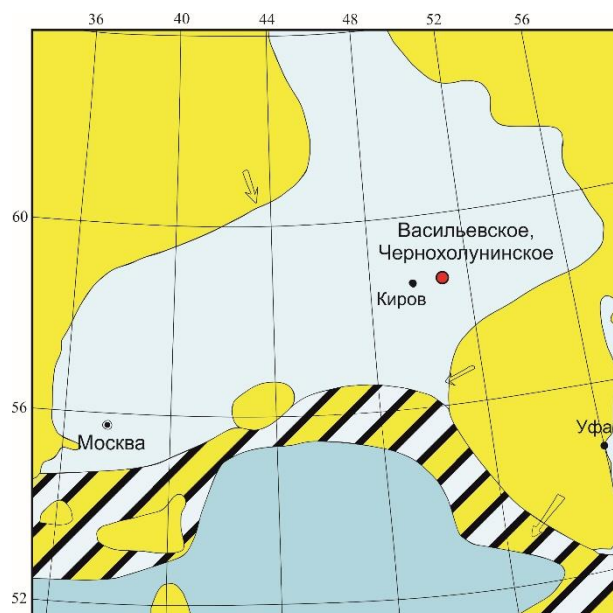


Рис. 3. Палеогеографическая схема (А.П. Виноградов [28], с упрощениями и дополнениями): среднеюрская эпоха, байосско-батский ярус. Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 3. Paleogeographic scheme (A.P. Vinogradov [28] with simplifications and additions): Middle Jurassic division, Bajocian-Bathonian stage. For legend, see Fig. 1

Меловый период

Месторождения и проявления бентонита мелового возраста территориально приурочены к Оренбургской области, Хабаровскому и Забайкальскому краю. На Дальнем Востоке месторождения и проявления бентонитовой глины в основном имеют вулканогенно-осадочный генезис и образовались в морских прибрежных условиях. На баланс числятся Ургальское (Хабаровский край) и Харанорское (Забайкальский край) месторождения бентонитов (рис. 4, а). Причем в официальном отчете Харанорское месторождение относится к четвертичным аллювиально-делювиальным образованиям, что нехарактерно для бентонитовых глин, и, по мнению авторов, имеет осадочный генезис.

Для большинства месторождений и проявлений бентонитовой глины на территории Дальнего Востока, приуроченных к меловому возрасту, харак-

терна зависимость состава обменного комплекса смектита от глубины. В приповерхностном слое (до глубины в 20–30 м) прослеживаются преимущественно щелочноземельные бентониты с преобладанием катионов кальция в межслое. С увеличением глубины содержание натрия в межслое возрастает, и бентониты постепенно переходят в щелочные или щелочно-щелочноземельные разности. Данную зональность можно объяснить вторичными процессами, а именно влиянием поверхностных и подземных вод. Стоит отметить, что для многих крупных месторождений мира вулканогенно-осадочного генезиса мелового возраста характерна подобная зональность [29, 30].

В связи со сложным логистическим расположением, а также недостаточной геологической изученностью региона данные месторождения не разрабатываются.

Меловые месторождения и проявления бентонитов Уральской провинции в основном расположены в Оренбургской области (рис. 4, б). Наиболее известны Ижбердинское и Сарайбашское. Глины этих месторождений имеют смешанный состав катионного комплекса и довольно высокую степень запесоченности. Они состоят на 40–45 % из минералов группы смектита, в виде примесей присутствуют кварц, полевой шпат, иллит, каолинит, хлорит и анатаз (табл. 3). Данные месторождения относятся к осадочному типу, их образование связано с размывом и переотложением первичных залежей бентонита. После активации кальцинированной

содой и внесения полимерных добавок данные бентониты применяются в различных классических отраслях промышленности, например, для приготовления буровых растворов, в качестве связующего в литейных формах и при окомковании железорудного концентрата.

Таблица 3. Минеральный состав бентонитов Ижбердинского и Сарайбашского месторождений, %

Table 3. Mineral composition of the Izhberdinskoe and Saraybashskoe deposits, %

Образец Sample	Смектит Smectite	Иллит Illite	Каолинит Kaolinite	Хлорит Chlorite	Кварц Quartz	Микроклин Microcline	Альбит Albite	Анатаз Anatase
Ижбердинское Izhberdinskoe	40,7	10,0	4,8	1,3	24,1	12,9	5,3	0,9
Сарайбашское Saraybashskoe	43,2	9,6	3,6	0,5	24,9	13,5	3,8	0,9

Помимо Дальневосточной и Уральской провинций, месторождения бентонита мелового возраста числятся на территории Крымского полуострова. Кудринское и Курцовское месторождения находятся вблизи г. Бахчисарай и г. Симферополь, представлены как щелочными, так и щелочноземельными разностями и имеют вулканогенно-осадочный генезис.

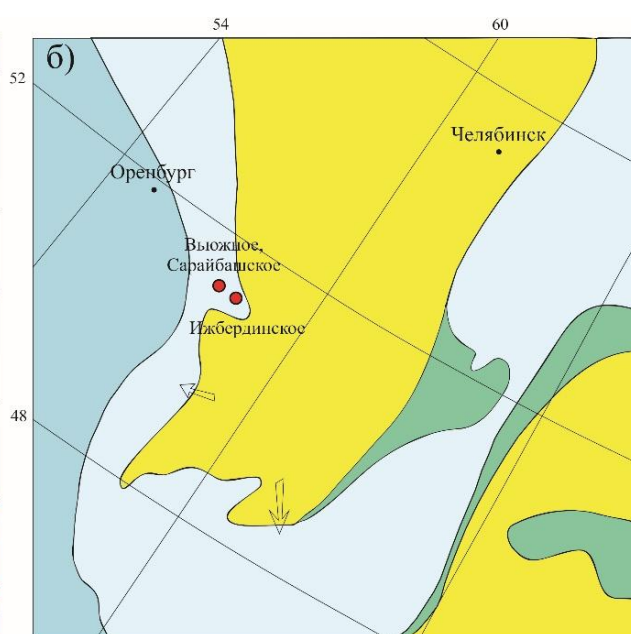
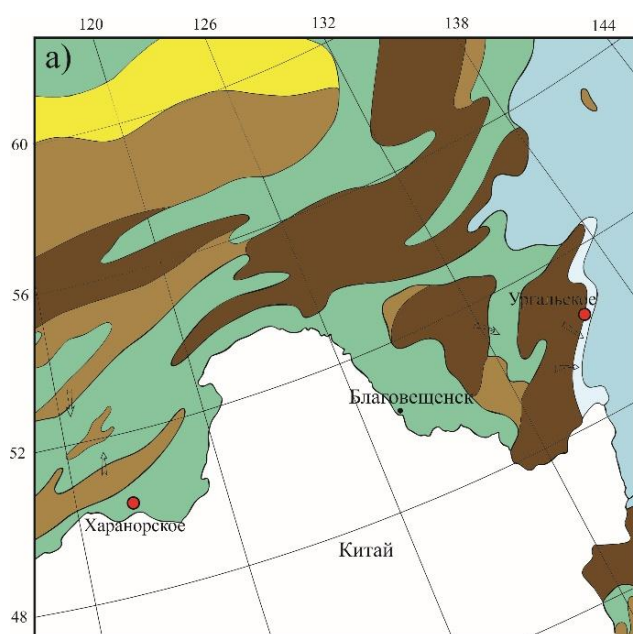


Рис. 4. Палеогеографическая схема (А.П. Виноградов [31] с упрощениями и дополнениями): а) нижний мел, валанжинский ярус; б) верхний мел, кампанский ярус. Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 4. Paleogeographic scheme (A.P. Vinogradov [31] with simplifications and additions): а) Lower Cretaceous, Valanginian stage; б) Upper Cretaceous, Campanian stage. For legend, see Fig. 1

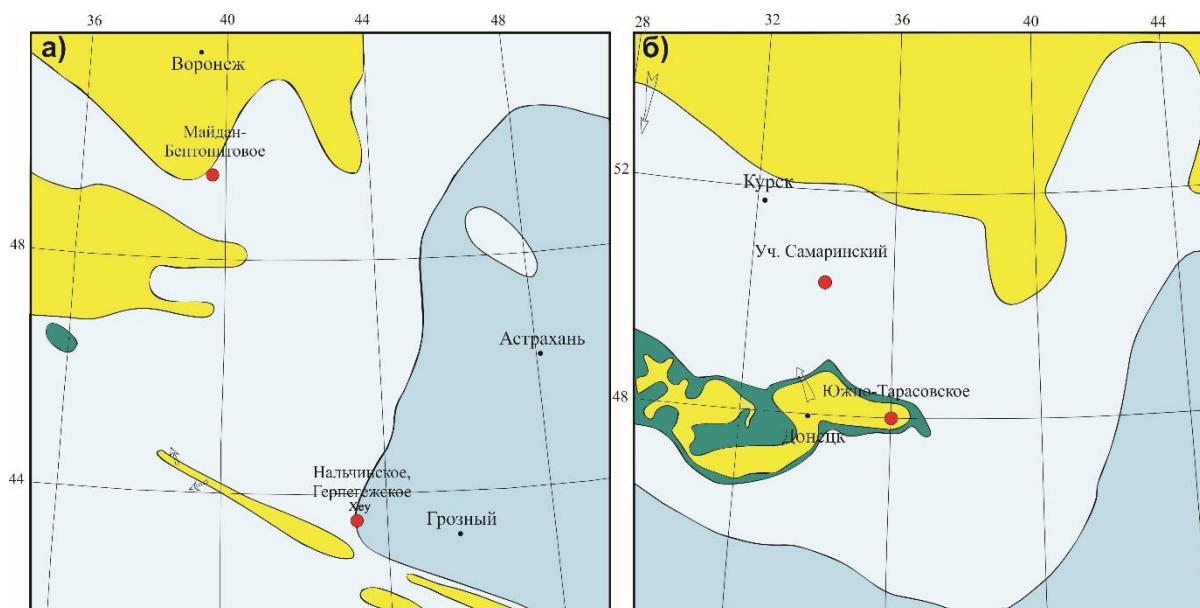


Рис. 5. Палеогеографическая схема (А.П. Виноградов [28] с упрощениями и дополнениями): а) палеогеновый период, палеоцен; б) палеогеновый период, ранне- и среднеэоценовое время. Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 5. Paleogeographic scheme (A.P. Vinogradov [28] with simplifications and additions): а) Paleogene period, Paleocene; б) Paleogene period, early and middle Eocene time. For legend, see Fig. 1

Палеогеновый период

Палеогеновые месторождения бентонитовой глины территориально расположены в Воронежской, Белгородской, Ростовской областях, Кабардино-Балкарской республике и в Приморском крае. Генезис палеогеновых месторождений Центральной России (Майдан-Бентонитовое, Никольское, уч. Самаринский), по-видимому, связан с преобразованием вулканического и/или терригенного материала в мелководных зонах морей (рис. 5, а, б). Исключением является Южно-Тарасовское месторождение, образование которого происходило в континентальных условиях, что, по-видимому, говорит о процессах переотложения бентонитов, т. е. о их осадочном генезисе (рис. 5, б).

Наиболее интересными и изученными являются участок Хеу и Герпегежское месторождение, расположенные в пределах Нальчикско-Черекской бентонитоносной площади (респ. Кабардино-Балкария). Месторождения приурочены к предгорной части Северного Кавказа и расположены на южном склоне низкогогорного Лесистого хребта. В региональном плане район Нальчинско-Черекской бентонитоносной площади расположен на сочленении Северо-Кавказской моноклинали с Восточно-Кубанским краевым прогибом. Территория сложена осадочными породами мелового, палеогенового и неогенового возрастов, перекрытыми чехлом рыхлых четвертичных отложений. Глинистые отложения приурочены к абазинской свите ($P_1^2 ab$), сложены двумя разновидностями глин: углистыми в основании свиты и смектитовыми (бентонитовы-

ми) в верхней ее части (рис. 6). Углистые глины имеют четкие контакты с подстилающими их мергелями и перекрывающими бентонитовыми глинами. За счет постоянства мощности и характерного черного цвета углистые глины являются надежным маркирующим горизонтом. Мощность его варьирует в пределах 0,4–1 м [32].

Пласт бентонитовых глин представлен пластичной разностью с прослоями серых камнеподобных опок. Мощность пласта бентонитовых глин колеблется в пределах 15–30 м (рис. 6). Угол падения пласта составляет на большей части территории участка порядка 5° , азимут падения – северо-восток.

По литологическому составу и строению пласт разделен на две пачки. Нижняя пачка представлена темно-серой, с зеленым оттенком однородной известковистой и сильно известковистой глиной с едва заметным зеленоватым оттенком.

По соотношению обменных катионов бентонитовые глины участка Хеу относятся к щелочным и щелочноземельным, однако они имеют ограниченную способность к набуханию даже после активации кальцинированной содой, что, по-видимому, связано с низким содержанием смектита и особенностями его строения [32]. Месторождения данного региона в настоящий момент не разрабатываются.

Бентониты щелочно-щелочноземельные и содержат от 32 до 63 % смектита. Наиболее высокое содержание смектита отмечается в известковистых разностях (среднее 63 %) [32]. Слюда присутствует в количестве 3–13 %, кварц – 5–16 %, кальцит 4–24 % (табл. 4, 5).

Таблица 4. Усредненный минеральный состав бентонитовой глины месторождения Хеу, % [32]

Table 4. Average mineral composition of bentonite clay of the Kheu deposit, % [32]

Смектит Smectite	Слюда Mica	Каолинит + хлорит Kaolinite+ chlorite	Кварц Quartz	Опал- кристобалитовая фаза Opal-cristobalite phase	Полевой шпат Feldspar	Кальцит Calcite	Цеолит Zeolite
48,7	7	1,33	9,7	12,7	2	14,7	14

Опал-кристобалитовая фаза в слабо известковистых разностях имеет высокое содержание, до 38 %, со средним значением 12,7 %, в известковистых, напротив, отсутствует. Содержание цеолита колеб-

лется от 0 до 12 %. Каолинит, хлорит и полевой шпат присутствуют в небольших количествах (0–2 %).

К палеогеновому возрасту также относится группа месторождений и проявлений Приморского края, расположенных вдоль морского побережья. После анализа палеофациальных карт становится понятно, что их образование связано не с девитрификацией пеплового материала в морских условиях, а с гидротермальным преобразованием пирокластических и магматических пород [9, 33]. Обусловлено это тем, что в палеогеновый период изучаемая территория представляла собой сушу с зонами активного вулканизма. Наиболее крупным и хорошо изученным является Зеркальное месторождение, числящееся на государственных балансах.

Таблица 5. Усредненный состав породообразующих оксидов бентонитовой глины месторождения Хеу, % [32]

Table 5. Average composition of rock-forming oxides of bentonite clay of the Kheu deposit, % [32]

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	ППП/LOI	Сумма/Sum
65,1	1,0	12,1	5,3	1,5	0,5	9,3	2,5	1,3	2,8	0,1	0,5	11,3	99,8

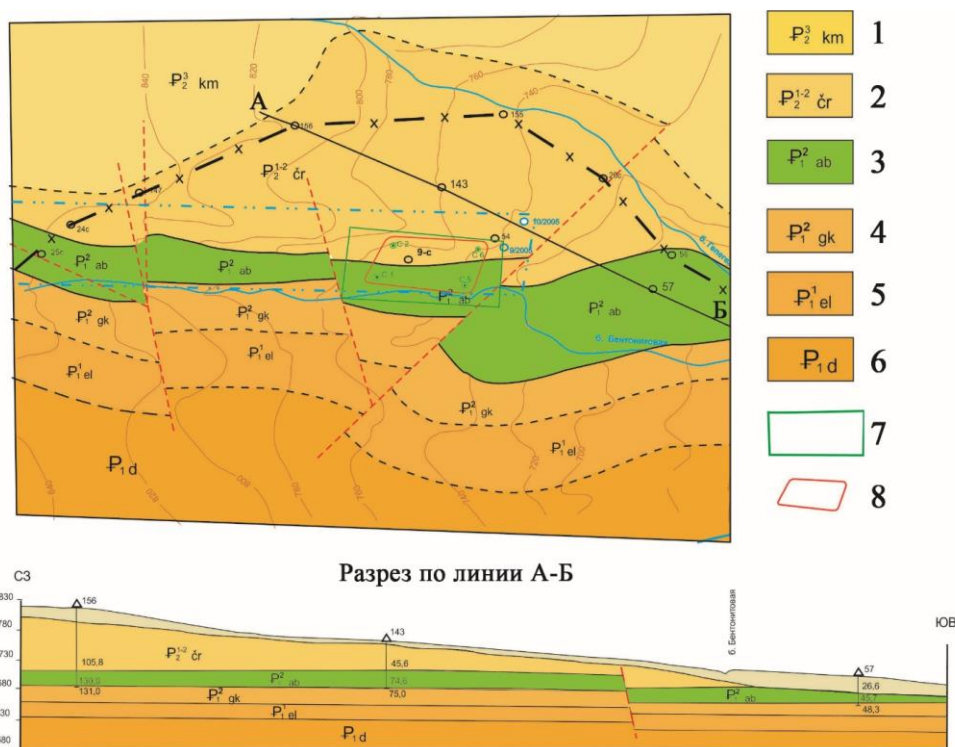


Рис. 6. Геологическая карта и разрез дочетвертичных отложений месторождения бентонитов Хеу [32]. Условные обозначения: 1–6 – палеогеновая система: 1 – кумская свита, известняк белый; 2 – черкесская свита, мергель светло- и темно-серый; 3 – абазинская свита, бентонитовая глина; 4 – свита Горячего ключа, мергель зеленовато-серый; 5 – эльбурганская свита, мергель зеленовато-серый с прослоями глины, 6 – Датский ярус, известняк светло-серый с прослоями мергеля; 7 – контур предварительного горного отвода; 8 – контур подсчета запасов в границах карьера первоочередной отработки

Fig. 6. Geological map and section of pre-Quaternary deposits of the Kheu bentonite deposit [32]. Legend: 1–6 – Paleogene system: 1 – Kumskaya suite, white limestone; 2 – Cherkesskaya suite, light and dark gray marl; 3 – Abazinskaya suite, bentonite clay; 4 – Goryachiy Klyuch suite, greenish-gray marl; 5 – Elburganskaya suite, greenish-gray marl with clay interlayers; 6 – Danish stage, light gray limestone with marl interlayers; 7 – outline of preliminary mining allotment, 8 – outline of reserves calculation within the boundaries of the quarry of primary development

Неогеновый период

На территории России располагаются две крупные бентонитоносные провинции неогенового возраста: Предуральская и Сахалинская.

Предуральская провинция включает месторождения Оренбургской области и республики Татарстан. Как видно из палеогеографической схемы (рис. 7, а), данные месторождения приурочены к области суши, что говорит об их осадочном генезисе – первичные бентониты переотлагались в результате транспортировки водными потоками. Бентонитовые глины Биклянского, Березовского, Соболевского, Саринского и Активного месторождений имеют среднее качество сырья, они зачастую запесочены и могут использоваться для приготовления буровых растворов и связующих для литейных форм и окомкования только после дополнительной активации кальцинированной содой, либо полимерными добавками.

Бентонитовая провинция о. Сахалин известна с начала XX в. На данный момент на балансе числится Тихменевское месторождение щелочного бентонита с балансовыми запасами порядка 1 млн т категории А+В+С₁. Бентонитоносность о. Сахалин генетически связана с туфо-осадочными угленосными отложениями миоценовой верхнедуйской свиты, реже нижнедуйской свиты палеогенового возраста [16]. Наблюдается парагенетическая связь между угленосными толщами, бентонитами и туфогенным материалом. Связь между бентонитовыми глинами и угленосными отложениями можно объяснить тем, что их образование происходит в

схожих условиях: условиях морских и озерных бассейнов, прибрежных шельфовых зон, лагун и заливов с проточной водой. Источниками пеплов, по которым образовывались бентониты, были центры миоценового вулканизма, расположенные от пос. Взморье на юге до пос. Вахрушев на севере побережья (рис. 8). Их местоположение в настоящее время фиксируется по вскрытым эрозией корневым частям вулканических аппаратов. Как было установлено [16], по составу они относятся к кислым породам риолитового и риолит-дацитового состава. В условиях слабощелочной среды прибрежных морских вод пепловый материал подвергся девитрификации с дальнейшим переходом в смектит [5].

Как видно из рис. 8, на территории Сахалина располагаются два крупных угольных бассейна: Центрально-Сахалинский и Западно-Сахалинский, в пределах которых и расположены основные месторождения каменного и бурого угля. Основная часть крупных месторождений бентонита приурочена к Центрально-Сахалинскому бассейну и локализуется внутри буроугольных бассейнов. Пласты бентонита залегают как в подошве, так и в кровле буроугольных отложений [5].

Наиболее детально изучены месторождения и проявления центрального Сахалина, расположенные вдоль восточного побережья, а именно Тихменевское месторождение, Вахрушевское, Макаровское и Леонидовское проявления, общие ресурсы которых составляют порядка 5 млн т [16].

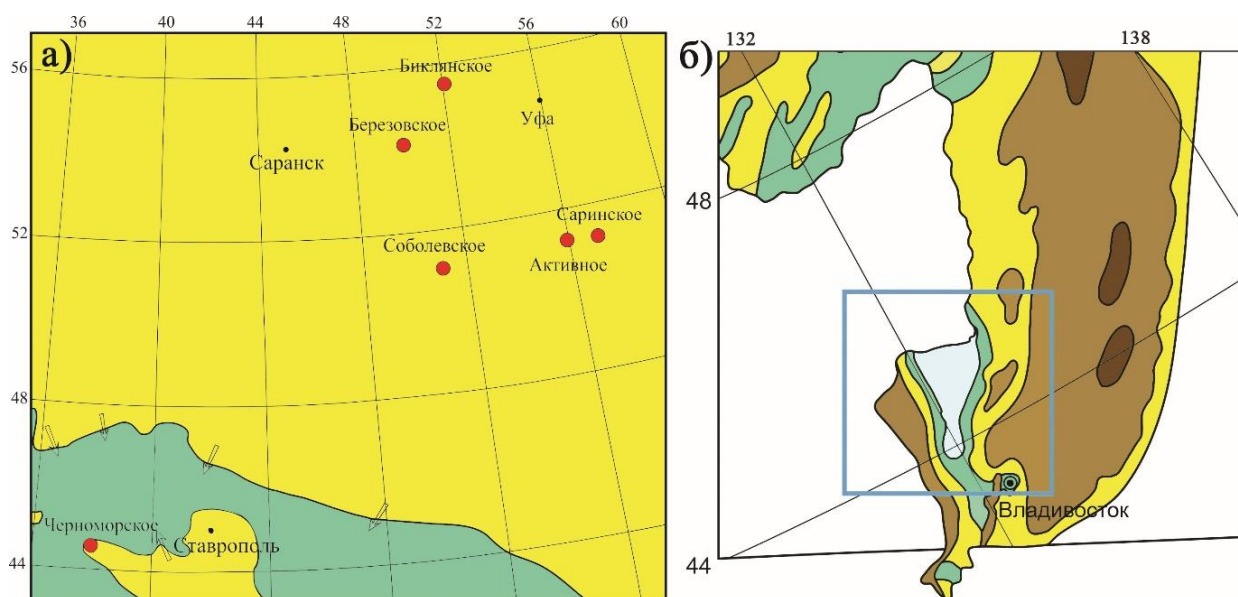


Рис. 7. Палеогеографическая схема (А.П. Виноградов [28] с упрощениями и дополнениями): а) неогеновый период, ранний плиоцен; б) синим квадратом обозначена зона основных выходов бентонитовых глин неогенового возраста Приморского края. Условные обозначения см. рис. 1

Fig. 7. Paleogeographic scheme (A.P. Vinogradov [28] with simplifications and additions): а) Neogene period, early Pliocene; б) blue square indicates the zone of the main outcrops of bentonite clays of the Neogene age in Primorsky Krai. For legend, see Fig. 1

Тихменевское месторождение поставлено на баланс с запасами категории C_2 – 705 тыс. т. Пласты бентонита залегают под углом 30–80°. Мощность пластов колеблется от 0,5 до 10 м. Среднее содержание смектита в данных месторождениях составляет 60–80 %. В некоторых случаях попадаются участки с содержаниями более 90 %. По составу обменного комплекса выделяются как щелочные, так и щелочноземельные разновидности [5].

На западном побережье расположено Солнцевское проявление бентонитовой глины, залегающее совместно с угольными пластами.

На юго-западном побережье Сахалина расположена серия проявлений бентонита. Они также приурочены к бурогольному бассейну. На участках отмечаются слои бентонитовой глины от 0,1 до 3 м.

Помимо крупных объектов на восточном побережье обнаружены и опробованы Островский и Новиковский участки бентонита, расположенные в южной части, на Тонино-Анивском полуострове. Содержание смектита достигает 60–80 %, мощность пластов не выдержана и колеблется от 1 до 10 м. Как и в других случаях, бентониты приурочены к бурогольному месторождению.

Несмотря на то, что о. Сахалин представляет собой бентонитоносную провинцию [5, 34], сложные геологические условия залегания пластов бентонитовой глины, а также эксплуатация бурогольных месторождений создают определенные сложности для разработки разведанных месторождений и, к настоящему моменту, добыча бентонитового сырья на острове не ведется [5].

Помимо Предуральской и Сахалинской провинций, в неогеновый период бентонитовые глины также образовывались на территории Приморского края, в основном в пределах Приханкайской низменности и Хасанской зоне. Палеогеографическая обстановка (рис. 7, б) данной территории в нижнем неогене (миоцен) была весьма благоприятна для образования бентонитов вулканогенно-осадочного генезиса [9]. В результате детальных исследований кайнозойских отложений Приморья [35, 36] было установлено, что миоценовые отложения образовывались исключительно в континентальных условиях. Генезис данных бентонитовых глин до конца не ясен и остается дискуссионным вопросом. Можно предположить, что проявления бентонитовой глины связаны с девитрификацией вулканических пеплов и, возможно, терригенного материала в озерных условиях.

По причине плохой изученности данного региона на бентонитовое сырье, а также широкого распространения лицензий на добычу угля (что усложняет поиски и дальнейшую добычу бентонита) разработка месторождений бентонитовой глины в данном районе не ведется.

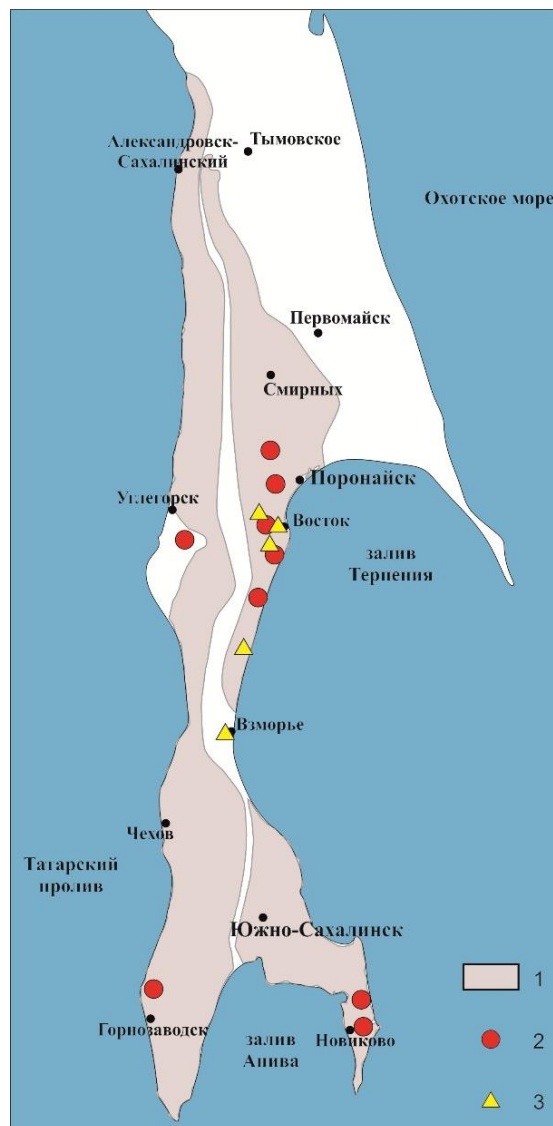


Рис. 8. Карта распространения месторождений и проявлений угля и бентонитовой глины на южной части о. Сахалин [5]. Условные обозначения: 1 – каменноугольно-бурогольный бассейн; 2 – месторождения и проявления бентонитовой глины; 3 – установленные центры миоценового вулканизма

Fig. 8. Map of the distribution of coal and bentonite clay deposits and occurrences in the southern part of Sakhalin Island [5]. Legend: 1 – Central Sakhalin coal-brown coal basin; 2 – West Sakhalin coal basin; 3 – bentonite clay deposits and occurrences; 4 – coal deposits; 5 – brown coal deposits; 6 – established centers of Miocene volcanism

Заключение

Проведенные исследования показали, что в фанерозое на территории Российской Федерации отмечается несколько наиболее активных геологических этапов бентонитообразования, включающих нижне-каменноугольный, среднеюрский, меловой, палеогеновый и неогеновый.

В первую очередь бентонитообразование связано с проявлением вулканической деятельности в пределах активных континентальных окраин и прилегающих к ним краевых частей платформ в эпоху активного вулканизма. Для вулканогенно-осадочного типа характерно накопление пеплового материала в полосе прибрежного мелководья – морских лагунах, заливах и мелководных приливно-отливных зонах. К гидротермальному генетическому типу относятся месторождения бентонита, образованные за счет преобразования туфов и пеплов под действием гидротерм.

Вулканогенные месторождения бентонита каменноугольного возраста расположены в центральной России и Сибири. Бентонитовые глины юрского возраста имеют ограниченное распространение и изучены только в Кировской области. К меловому возрасту относятся вулканогенные месторождения и проявления бентонита республики Крым и Хабаровского края. К палеогеновому возрасту относится группа месторождений и проявлений Приморского края, расположенных вдоль побережья, их образование связано с гидротермальным преобразованием пирокластических и магматических пород. Проявления неогенового возраста Приморского края имеют вулканогенно-осадочный генезис и образовывались, по-видимому, в озерных условиях, где накапливались пеплы кислого состава и терригенный материал. Бентонитовая провинция о. Сахалин генетически связана с миоценовыми туфо-осадочными угленосными отложениями верхнедуйской, реже нижнедуйской свитами палеогено-

вого возраста. Наблюдается парагенетическая связь между угленосными толщами, бентонитами и туфогенным материалом.

К группе бентонитовых глин осадочного генезиса, образовавшихся за счет вымывания и переноса первичного глинистого материала из зон выветривания континентальных участков, относятся месторождения и проявления мелового возраста Уральской провинции, расположенные в Оренбургской области. Палеогеновые месторождения бентонитовой глины осадочного типа территориально расположены в Воронежской, Белгородской, Ростовской областях, Кабардино-Балкарской республике и в Приморском крае. Генезис палеогеновых месторождений Центральной России связан с преобразованием вулканического или терригенного материала в мелководных зонах морей. Предуральская провинция неогенового возраста представлена месторождениями Оренбургской области и республики Татарстан. Данные месторождения приурочены к области палеосуши, где первичные бентониты были переотложены в результате транспортировки водными потоками.

Таким образом, в качестве наиболее перспективных регионов для целей расширения минерально-сырьевой базы высококачественных бентонитов являются бентонитовые провинции каменноугольного возраста Сибири, а также Дальний Восток, включая Хабаровский, Забайкальский и Приморский край, а также о. Сахалин, где бентонитоносность связана с меловым, палеогеновым и неогеновым вулканизмом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: Report of the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) nomenclature committee for 2006 / S. Guggenheim, J.M. Adams, D.C. Bain, F. Bergaya, M.F. Brigatti, V.A. Drits, M.L.L. Formoso, E. Galán, T. Kogure, H. Stanjek // *Clays Clay Miner.* – 2006. – Vol. 54. – № 6. – P. 761–772.
2. Дриц В.А., Косовская А.Г. Глинистые минералы: смектиты, смешаннослойные образования. – М.: Наука, 1990. – 214 с.
3. Дистанов У.Г. Фанерозойские осадочные палеобассейны России: проблемы эволюции и минерагения неметаллов. – М.: Изд-во «Геоинформатика», 2000. – 399 с.
4. Christidis G.E. Advances in the characterization of industrial minerals. – London; Twickenham, UK: European Mineralogical Union, 2011. – 485 p.
5. Белоусов П.Е., Карелина Н.Д. Вулканогенно-осадочные и гидротермальные месторождения бентонитовой глины // *Вулканология и сейсмология.* – 2022. – № 6. – С. 63–75. DOI: 10.31857/S0203030622060025
6. Наседкин В.В., Кваша Ф.С., Стаханов В.В. Бентониты в промышленности России. – М.: ГЕОС, 2001. – 236 с.
7. Кирсанов Н.В. Генетическая классификация и закономерности размещения бентонитовых глин // *Сырьевая база бентонитов СССР и их использование в народном хозяйстве.* – М.: Недра, 1972. – С. 39–55.
8. Christidis G.E. Genesis and compositional heterogeneity of smectites. P. III: Alteration of basic pyroclastic rocks – a case study from the Troodos Ophiolite Complex, Cyprus // *American Mineralogist.* – 2006. – Vol. 91 (4). – P. 685–701. DOI: 10.2138/am.2006.2001
9. Белоусов П.Е., Чупаленков Н.М., Карелина Н.Д. Бентонитовые глины Приморского края // *Материалы V Российского совещания по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ».* – М., 2022. – С. 84–85.
10. Takagi T. Bentonite in Japan – geology and industries // *Geological Survey of Japan.* – 2005. – № 425. – P. 1–13.
11. Geochemical characteristics of the alteration of volcanic and volcanoclastic rocks in the Feres Basin, Thrace, NE Greece / I. Marantos, Th. Markopoulos, G.E. Christidis, V. Perdikatsis // *Clay Minerals.* – 2008. – Vol. 43 (4). – P. 575–595. DOI: 10.1180/claymin.2008.043.4.05
12. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: a review of their nature and significance / S. Dai, C.R. Ward, I.T. Graham, D. French, J.C. Hower, L. Zhao, X. Wang // *Earth-Science Reviews.* – 2017. – Vol. 175. – P. 44–74.
13. Rare earth and critical element chemistry of the volcanic ash-fall parting in the fire clay coal, Eastern Kentucky, USA / J. Liu, S. Dai, D. Berti, C.F. Eble, M. Dong, Y. Gao, J.C. Hower // *Clays Clay Miner.* – 2023. – Vol. 71. – P. 309–339. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42860-023-00237-5>

14. Carboniferous bentonites from 10th Khutor deposit (Russia): composition, properties and features of genesis / P. Belousov, N. Chupalnikov, G.E. Christidis, O. Zakusina, S. Zakusin, I. Morozov, M. Chernov, T. Zaitseva, E. Tyupina, V. Krupskaya // *Applied Clay Science*. – 2021. – Vol. 215. – № 1. – P. 1–14.
15. Spears D.A. The origin of tonsteins, an overview, and links with seatearths, fireclays and fragmental clay rocks // *International Journal of Coal Geology*. – 2012. – Vol. 94. – P. 22–31.
16. Коренбаум В.С., Ташилкин В.А., Долгун Л.П. Каолиновые и монтмориллонитовые глины Приморья. Отчет по теме «Обобщение материалов по беложгущимся и бентонитовым глинам Приморья за 1969–1970 годы». – Владивосток: ПТГУ, Южно-Приморская экспедиция, 1970. – 305 с.
17. Семенов Е.Ф., Олейникова Л.Л. Составление прогнозных карт м-ба 1:1000000 на цеолиты, бентониты, вермикулиты и другие нетрадиционные виды сырья для сельского хозяйства Приморья. – Владивосток: ПГО «Приморгеология», Геологосъемочная экспедиция, 1987. – 231 с.
18. Белоусов П.Е., Крупская В.В. Бентонитовые глины России и стран ближнего зарубежья // *Георесурсы*. – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 79–90. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.79-90>
19. Влияние условий образования на структурно-текстурные свойства бентонитовой глины месторождения 10-й Хутор (респ. Хакасия) / П.Е. Белоусов, Н.М. Чупалников, И.А. Морозов, С.В. Закусин, О.В. Закусина, М.С. Чернов, Е.А. Тюпина, В.В. Крупская // *Глины: Материалы V Российского совещания по глинам и глинистым минералам*. – М., 2022. – С. 86–87.
20. Christidis G.E., Huff W. Geological aspects and genesis of bentonites // *Elements*. – 2009. – Vol. 5 (2). – P. 93–98. DOI: 10.2113/gselements.5.2.93
21. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации: «Глины Бентонитовые», «Глины для буровых растворов», «Формовочные материалы». – М.: Росгеолфонд, 2019.
22. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 1. Mineralogical and chemical evidence / J. Hower, E.V. Eslinger, M.E. Hower, E.A. Perry // *Bull. Geol. Soc. Am.* – 1976. – Vol. 87. – P. 725–737.
23. Следы катастрофических вулканических извержений в московском ярусе (средний пенсильваний, карбон) центральной части восточно-европейской платформы / Ю.В. Яшунский, А.С. Алексеев, Б.А. Сахаров, Б.Б. Шкурский, С.А. Новикова, И.А. Новиков, А.В. Федоров, С.В. Гришин // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. – 2022. – Т. 30. – 2. – С. 39–59.
24. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР. Т. II. / гл. ред. А.П. Виноградов. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1969. – 70 с.
25. Жигарев В.В., Коренев В.В. Геология и зональность качественных характеристик некоторых месторождений бентонитовых глин России // *Глины-2019: Материалы IV Российского Совещания по глинам и глинистым минералам*. – М., 2019. – С. 252–254.
26. Богомазов В.М. Стратиграфия и условия образования доугленосных и угленосных отложений карбона и перми Минусинского бассейна // *Вопросы геологии угленосных отложений азиатской части СССР*. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 79–116.
27. Минералого-геохимическая идентификация продуктов эксплозивного вулканизма в углях минусинского бассейна / С.И. Арбузов, С.С. Ильенок, А.В. Вергунов, М.В. Шалдыбин, В.М. Соболенко, П.Е. Некрасов // *Материалы конференции*. – Томск, 2017. – С. 35–37.
28. Атлас литолого-палеогеографических карт Русской платформы и ее геосинклинального обрамления / гл. ред. А.П. Виноградов. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1961. – Ч. 2. – 104 с.
29. Mineralogy, geochemistry, and genesis of bentonites in Upper Cretaceous pyroclastics of the Bereketli member of the Resadiye Formation, Resadiye (Tokat), Turkey / S. Kadira, T. Kùlah, H. Erkoyun, N.O. Uyanika, M. Eren, W.C. Elliott // *Applied Clay Science*. – 2021. – Vol. 204. – P. 1–19.
30. Upper Campanian bentonite layers in the Scaglia-type limestone of the northern Dinarides (SE Slovenia) / D. Gercar, N. Zupancic, A. Waskowska, J. Pavsic, B. Rozic // *Cretaceous Research*. – 2022. – Vol. 134. – P. 1–20.
31. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР / гл. ред. А.П. Виноградов. – М.: Всесоюзный аэрогеологический трест Министерства геологии СССР, 1968. – Т. 3. – 80 с.
32. Отчет о результатах геологоразведочных работ на бентонитовые глины участка Хеу с подсчетом запасов и ТЭО постоянных кондиций в Черекском районе КБР / Н.А. Харисова, М.А. Зюряев, Р.М. Харисов, В.И. Чичев. – Нальчик: ООО ГК «Севкавгеолпроект», 2011. – 266 с.
33. Compositional and textural evidences of Na-bentonite authigenesis in the Pellegrini lake deposit (Neuquen basin, Argentina) / T.B. Musso, G. Pettinari, A.B. Galan, G.A. Martinez, M. Pozo // *Applied Clay Science*. – 2024. – № 261. – P. 1–11.
34. Бентониты Сахалина / А.А. Сабитов, Т.П. Конохова, Ф.А. Трофимова, И.И. Зайнуллин, В.Ф. Евсеев, А.Г. Лапшин, А.Н. Речкин // *Разведка и охрана недр*. – 2007. – № 1. – С. 16–21.
35. Седых А.К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья. – Владивосток: Изд-во «Дальнаука», 2008. – 246 с.
36. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И. Стратиграфия палеоген-неогеновых отложений Приморья. – Владивосток: Изд-во «Дальнаука», 2010. – 166 с.

Информация об авторах

Петр Евгеньевич Белоусов, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35. belousov.peter@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2657-5828>

Виктория Валерьевна Крупская, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35. krupskaya@ruclay.com; <https://orcid.org/0000-0002-6127-748X>

Анастасия Олеговна Румянцева, младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35. rumyantseva.anastasia2017@yandex.ru

Татьяна Александровна Королева, младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35. tanakoro@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8169-7673>

Сергей Вячеславович Закусин, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35. zakusinsergey@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2420-5388>

Поступила в редакцию: 25.11.2024

Поступила после рецензирования: 06.03.2025

Принята к публикации: 04.08.2025

REFERENCES

1. Guggenheim S., Adams J.M., Bain D.C., Bergaya F., Brigatti M.F., Drits V.A., Formoso M.L.L., Galán E., Kogure T., Stanjek H. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: report of the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) nomenclature committee for 2006. *Clays Clay Miner*, 2006, vol. 54, no. 6, pp. 761–772.
2. Drits V.A., Kossovskaya A.G. *Clay minerals: smectites, mixed-layer formations*. Moscow, Nauka Publ., 1990. 214 p. (In Russ.)
3. Distanov U.G. *Phanerozoic sedimentary paleobasins of Russia: problems of evolution and minerageny of non-metals*. Moscow, Geoinformatics Publ., 2000. pp. 83–96. (In Russ.)
4. Christidis G.E. *Advances in the characterization of industrial minerals*. London, Twickenham, UK, European Mineralogical Union, 2011. 485 p.
5. Belousov P.E., Karelina N.D. Volcanogenic-sedimentary and hydrothermal deposits of bentonite clay. *Volcanology and Seismology*, 2022, no. 6, pp. 63–75. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0203030622060025
6. Nasedkin V.V., Kvasha F.S., Stakhanov V.V. *Bentonites in the industry of Russia*. Moscow, GEOS Publ., 2001. 236 p. (In Russ.)
7. Kirsanov N.V. Genetic classification and patterns of distribution of bentonite clays. *Raw material base of bentonites of the USSR and their use in the national economy*. Moscow, Nedra Publ., 1972. pp. 39–55. (In Russ.)
8. Christidis G.E. Genesis and compositional heterogeneity of smectites. P. III: Alteration of basic pyroclastic rocks – a case study from the Troodos Ophiolite Complex, Cyprus. *American Mineralogist*, 2006, vol. 91 (4), pp. 685–701. DOI: 10.2138/am.2006.2001
9. Belousov P.E., Chupalenkov N.M., Karelina N.D. Bentonite clays of Primorsky Krai. *Proceedings of the V Russian Conference on Clays and Clay Minerals*. Clays. Moscow, 2022. pp. 84–85. (In Russ.)
10. Takagi T. Bentonite in Japan – geology and industries. *Geological Survey of Japan*, 2005, no. 425, pp. 1–13.
11. Marantos I., Markopoulos Th., Christidis G.E., Perdikatsis V. Geochemical characteristics of the alteration of volcanic and volcanoclastic rocks in the Feres Basin, Thrace, NE Greece. *Clay Minerals*, 2008, vol. 43 (4), pp. 575–595. DOI: 10.1180/claymin.2008.043.4.05
12. Dai S., Ward C.R., Graham I.T., French D., Hower J.C., Zhao L., Wang X. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: a review of their nature and significance. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 175, pp. 44–74.
13. Liu J., Dai S., Berti D., Eble C.F., Dong M., Gao Y., Hower J.C. Rare earth and critical element chemistry of the volcanic ash-fall parting in the fire clay coal, Eastern Kentucky, USA. *Clays Clay Miner*, 2023, vol. 71, pp. 309–339. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42860-023-00237-5>
14. Belousov P., Chupalenkov N., Christidis G.E., Zakusina O., Zakusin S., Morozov I., Chernov M., Zaitseva T., Tyupina E., Krupskaya V. Carboniferous bentonites from 10th Khutor deposit (Russia): composition, properties and features of genesis. *Applied Clay science*, 2021, vol. 215, no. 1, pp. 1–14.
15. Spears D.A. The origin of tonsteins, an overview, and links with seatearths, fireclays and fragmental clay rocks. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 94, pp. 22–31.
16. Korenbaum V.S., Tashchilkin V.A., Dolgun L.P. *Kaolin and montmorillonite clays of Primorye. Report on the topic "Generalization of materials on white-burning and bentonite clays of Primorye for 1969–1970"*. Vladivostok, PTSU, South Primorsky Expedition Publ., 1970. 305 p. (In Russ.)
17. Semenov E.F., Oleynikova L.L. *Preparation of forecast maps of 1:1000000 scale for zeolites, bentonites, vermiculites and other non-traditional types of raw materials for agriculture in Primorye*. Vladivostok, PGO "Primorgeologiya", Geological Survey Expedition Publ., 1987. 231 p. (In Russ.)
18. Belousov P.E., Krupskaya V.V. Bentonite clays of Russia and neighboring countries. *Georesources*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 79–90. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.79-90>
19. Belousov P.E., Chupalenkov N.M., Morozov I.A., Zakusin S.V., Zakusina O.V., Chernov M.S., Tyupina E.A., Krupskaya V.V. Influence of formation conditions on the structural and textural properties of bentonite clay from the 10th Khutor deposit (Republic of Khakassia). *Proc. of the V Russian Conference on Clays and Clay Minerals*. Clays. Moscow, 2022. pp. 86–87. (In Russ.)
20. Christidis G.E., Huff W. Geological aspects and genesis of bentonites. *Elements*, 2009, vol. 5 (2), pp. 93–98. DOI: 10.2113/gselements.5.2.93
21. State balance of mineral reserves of the Russian Federation. *Bentonite Clays*, 2019; "Clays for Drilling Fluids", 2019; "Molding Materials". Moscow, Rosgeolfond Publ., 2019. (In Russ.)
22. Hower J., Eslinger E.V., Hower M.E., Perry E.A. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: 1. Mineralogical and chemical evidence. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1976, vol. 87, pp. 725–737.

23. Yashunskii Yu.V., Alekseev A.S., Sakharov B.A., Shkurskii B.B., Novikova S.A., Novikov I.A., Fedorov A.V., Grishin S.V. Traces of catastrophic volcanic eruptions in the Moscovian stage (middle Pennsylvanian, Carboniferous) of the central part of the East European platform. *Stratigraphy. Geological correlation*, 2022, vol. 30, no. 2, pp. 39–59 (In Russ.)
24. Vinogradov A.P., Vereshchagin V.N., Ronov A.B., Nalivkin V.D., Pozner V.M. *Atlas of lithological and paleogeographic maps of the USSR*. Moscow, State Scientific and Technical Publ. House of Literature on Geology and Subsoil Protection, 1969. 70 p. (In Russ.)
25. Zhigarev V.V., Korenev V.V. Geology and zoning of qualitative characteristics of some deposits of bentonite clays in Russia. *Proc. of the IV Russian Conference on Clays and Clay Minerals. Clays-2019*. Moscow, 2019. pp. 252–254. (In Russ.)
26. Bogomazov V.M. Stratigraphy and conditions of formation of pre-coal-bearing and coal-bearing deposits of the Carboniferous and Permian of the Minusinsk Basin. *Issues of geology of coal-bearing deposits in the Asian part of the USSR*. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ. house, 1961. pp. 79–116. (In Russ.)
27. Arbuzov S.I., Ilyenok S.S., Vergunov A.V., Shal'dybin M.V., Sobolenko V.M., Nekrasov P.E. Mineralogical and geochemical identification of explosive volcanism products in coals of the Minusinsk basin. *Conference Proceedings*. Tomsk, 2017. pp. 35–37. (In Russ.)
28. *Atlas of lithological and paleogeographic maps of the Russian platform and its geosynclinal framework*. Ed. by A.P. Vinogradov. Moscow, State Scientific and Technical Publ. House of Literature on Geology and Subsoil Protection, 1961. P. 2, 104 p. (In Russ.)
29. Kadira S., K ulah T., Erkoyun H., Uyanika N.O., Eren M., Elliott W.C. Mineralogy, geochemistry, and genesis of bentonites in Upper Cretaceous pyroclastics of the Bereketli member of the Resadiye Formation, Resadiye (Tokat), Turkey. *Applied Clay Science*, 2021, vol. 204, pp. 1–19.
30. Gercar D., Zupancic N., Waskowska A., Pavsic J., Rozic B. Upper Campanian bentonite layers in the Scaglia-type limestone of the northern Dinarides (SE Slovenia). *Cretaceous Research*, 2022, vol. 134, pp. 1–20.
31. *Atlas of lithological and paleogeographic maps of the USSR*. Ed. by A.P. Vinogradov. Moscow, All-Union Aerogeological Trust of the USSR Ministry of Geology Publ., 1968. Vol. 3. 80 p. (In Russ.)
32. Kharisova N.A., Zyuryaev M.A., Kharisov R.M., Chichev V.I. *Report on the results of geological exploration of bentonite clays of the Kheu site with reserves calculation and feasibility study of permanent conditions in the Cherek district of the Kabardino-Balkarian Republic*. Nalchik, LLC GC “Sevkavgeolproekt” Publ., 2011. 266 p. (In Russ.)
33. Musso T.B., Pettinari G., Galan A.B., Martinez G.A., Pozo M. Compositional and textural evidences of Na-bentonite authigenesis in the Pellegrini lake deposit (Neuquen basin, Argentina). *Applied Clay Science*, 2024, no. 261, pp. 1–11.
34. Sabitov A.A., Konyukhova T.P., Trofimova F.A., Zainullin I.I., Evseev V.F., Lapshin A.G., Rechkin A.N. Sakhalin bentonites. *Exploration and protection of mineral resources*, 2007, no. 1, pp. 16–21. (In Russ.)
35. Sedykh A.K. *Cenozoic riftogenic depressions of Primorye*. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2008. 246 p. (In Russ.)
36. Pavlyutkin B.I., Petrenko T.I. *Stratigraphy of Paleogene-Neogene sediments of Primorye*. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2010. 166 p. (In Russ.)

Information about the authors

Petr E. Belousov, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 35, Staromonetny bystreet, Moscow, 119017, Russian Federation. belousov.peter@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2657-5828>

Victoria V. Krupskaya, Cand. Sc., Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 35, Staromonetny bystreet, Moscow, 119017, Russian Federation. krupskaya@ruclay.com; <https://orcid.org/0000-0002-6127-748X>

Anastasia O. Rummyantseva, Junior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 35, Staromonetny bystreet, Moscow, 119017, Russian Federation. rummyantseva.anastasia2017@yandex.ru

Tatyana A. Koroleva, Junior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 35, Staromonetny bystreet, Moscow, 119017, Russian Federation. tanakoro@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8169-7673>

Sergey V. Zakusin, Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 35, Staromonetny bystreet, Moscow, 119017, Russian Federation. zakusinsergey@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2420-5388>

Received: 25.11.2024

Revised: 06.03.2025

Accepted: 04.08.2025