

УДК 551.217(551.3)

ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНЫЕ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕНТОНитОВОЙ ГЛИНЫ

© 2022 г. П. Е. Белоусов^а, *, Н. Д. Карелина^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН),
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

*e-mail: pitbl@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2022 г.

После доработки 18.05.2022 г.

Принята к публикации 23.08.2022 г.

Данная работа посвящена изучению бентонитовых глин вулканогенного генезиса. Рассмотрены геолого-структурная позиция месторождений, палеогеографические условия осадконакопления, структурно-текстурные особенности пород и их диагностические признаки. Выделены рудоконтролирующие факторы образования бентонитов вулканогенно-осадочного и гидротермального происхождения. Выполнен сравнительный анализ исходного вулканогенного материала месторождений России и зарубежных стран. На примере Даш-Салахлинского месторождения (респ. Азербайджан) и бентонитоносной провинции о. Сахалин показаны особенности образования бентонитов различного генезиса. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что состав материнского вещества при образовании бентонитов колеблется в широких пределах от пород базальтового до риолитового состава. При этом основным фактором, определяющим образование бентонитов, является не состав материнского вещества, а тип бассейна седиментации и физико-химические условия.

Ключевые слова: бентонит, минералообразующие системы, вулканизм, диагенез, гидротермальные процессы, Сахалин, Даш-Салахлинское месторождение

DOI: 10.31857/S0203030622060025

ВВЕДЕНИЕ

Бентонитовые глины являются одними из важнейших неметаллических полезных ископаемых, используемых не только в классических отраслях промышленности, таких как металлургия, литейное производство и бурение, но и в высокотехнологичных – производство нанокompозитов, системы доставки лекарственных компонентов, элементов инженерных буферов безопасности при захоронении РАО и др. [Белоусов, Крупская, 2019]. Всего насчитывается более 200 различных отраслей использования бентонитовой глины. Ориентировочные запасы в России составляют 194 млн т категории А + В + С₁ и 145.2 млн т категории С₂ [Государственный баланс запасов полезных ископаемых, 2019]. Всего на баланс поставлено 38 месторождения.

В минералогическом плане, бентониты относятся к тонкодисперсным слоистым алюмосиликатам, состоящим не менее чем на 50–60% из минералов группы смектита, в основном монтмориллонита. Структура монтмориллонита представляет собой трехслойный пакет (2 : 1): два слоя кремнекислородных тетраэдров, с двух сторон покрывают слой алюмогидроксильных октаэдров. Дан-

ные особенности структуры придают монтмориллониту особые свойства, такие как связующая способность, способность к набуханию, высокая термоустойчивость и сорбционные свойства.

Большинство месторождений высококачественного бентонита связано с вулканизмом, а их образование является результатом разложения вулканогенных и магматических пород (туфы, туффиты, пеплы, порфиры и т.п.) под действием слабощелочных морских вод или гидротерм. Рассматривая геолого-структурные обстановки образования бентонитовых глин, можно выделить два основных типа систем: активные континентальные окраины и прилегающие к ним краевые части платформ в эпоху активного вулканизма (рис. 1а) и континентальные окраины, краевые части платформ и щитов в эпоху стабилизации тектонических движений (см. рис. 1б). В данной работе будет рассмотрен только первый тип, а именно месторождения бентонита вулканогенно-осадочного (диагенетические) и гидротермального генезиса.

Основными целями данного исследования были обзор особенностей образования бентонитов вулканогенного генезиса и изучение состава

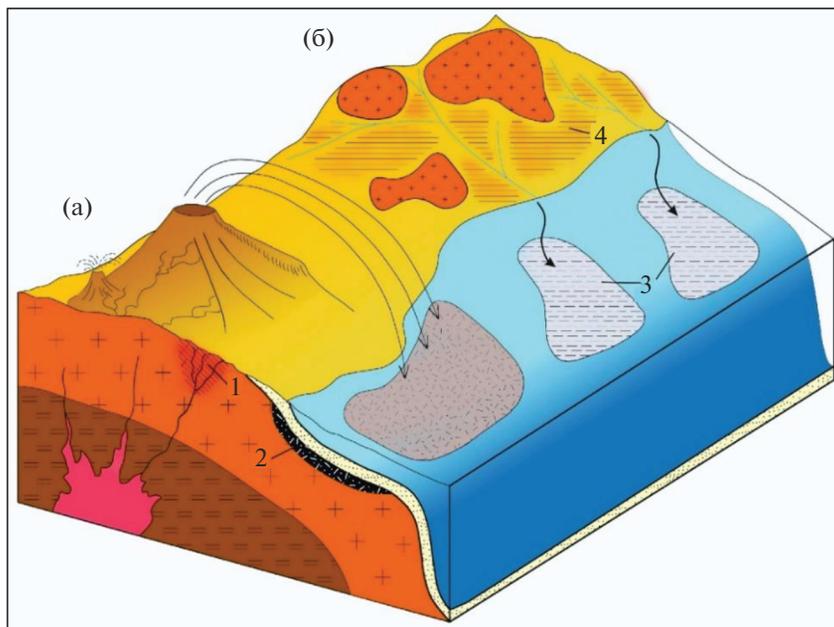


Рис. 1. Упрощенная схема минералообразующих систем бентонитовых месторождений.
 а – активная континентальная окраина; б – пассивная континентальная окраина.
 1–4 – генетические типы: 1 – гидротермальные, 2 – вулканогенно-осадочные, 3 – осадочные, терригенно-диагенетические, 4 – остаточные.

исходных пород, подвергавшихся аргиллитизации на примере различных месторождений России и зарубежных стран. С этой целью были собраны статистические данные по химическому составу наиболее крупных и хорошо изученных месторождений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Данная работа подготовлена на основании как собственных полевых и лабораторных работ по месторождениям бентонита России (10-й Хутор, Тихменевское, Вахрушевское, Макаровское), стран СНГ и Ближнего Востока (Даш-Салахлинское, Таганское, Фердос), так и опубликованных материалов по наиболее крупным и хорошо изученным месторождениям Греции (Чиос, Самос, Ферес, Скалома, Сапес) [Koutsopoulou et al., 2016], Турции (Халдере, Еникой, Чагис) [Kadir et al., 2019] и Кипра (Поликантос, Скуриотисс, Мони) [Christidis, 2006].

Были проанализированы геологические условия образования и строение месторождений, палеогеографические условия осадконакопления и структурно-текстурные особенности образцов бентонитов. На основании соотношения породообразующих и микроэлементов был восстановлен состав исходных пород. Использовался титановый модуль и диаграмма Винчестера–Флойда [Winchester, Floyd, 1977; Spears, Kanaris-Sotiriou, 1979]. Титановый модуль рассчитывается из соотношения оксида титана к оксиду алюминия. От-

ношение TiO_2/Al_2O_3 менее 0.02 соответствует кислым породам, более 0.06 – для основных, а промежуточные значения модуля характерны для пород среднего и щелочного состава. Диаграмма Винчестера–Флойда строится на основании соотношений малоподвижных элементов – циркона к титану и ниобия к иттрию.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ

Существуют различные взгляды на генетическую классификацию бентонитовых глин. По своей сути они схожи, связывая образование бентонитов с изменением пеплов и туфов, но в тоже время имеют некоторые принципиальные отличия. Например, М. Вилсон [Wilson, 2013] подразделяет бентониты в зависимости от механизма их образования: выветривание, переотложение, педогенез, диагенез и гидротермальное преобразование материнских пород. Д. Кристидис и В. Хаф [Christidis, Huf, 2009] выделяет бентониты диагенетического, гидротермального и осадочного генезиса. Причем, осадочный тип рассматривается как образование смектита по терригенному материалу и глинистым минералам (каолинит, иллит) в соленых озерах и солончаках, без процесса разложения вулканического пепла.

Российская генетическая классификация бентонитовых глин, имеет свои особенности [Кирсанов, 1972; Дистанов, 2000; Наседкин и др., 2001]. Месторождения бентонитов делятся на вулкано-

генно-осадочные, гидротермальные, осадочные и остаточные (элювиальные). Рассмотрим два основных генетических типа связанных с вулканизмом.

Для бентонитов *вулканогенно-осадочного типа* характерно высокое качество сырья и пластообразная форма тел. Они формируются путем подводного преобразования вулканических пеплов [Кирсанов, 1972; Дистанов, 2000; Наседкин и др., 2001]. в слабощелочных условиях прибрежных частей морей, заливах, лагунах и озерах. В более ранних работах [Кирсанов, 1972] было принято считать, что состав обменного комплекса бентонитовой глины зависит от типа водоема, в котором осаждался пепловый материал – в пресных водах образуется щелочно-земельный тип бентонитов (преобладает Са и Mg), а в морских водах, обогащенных солями натрия, образуются щелочные бентониты с преобладанием катионов натрия в межслое. Однако, изучение месторождений о. Сахалин и Приморского края показало, что тип бентонита в основном связан со вторичными изменениями, например, влиянием подземных и грунтовых вод, о чем свидетельствует зональность месторождений – на глубине ниже уровня грунтовых вод идет постепенный переход от щелочноземельных к щелочным разновидностям бентонита [Белоусов, Наседкин, 2015; Белоусов и др., 2022]. Одним из явных диагностических признаков является присутствие реликтов пористого вулканического стекла, которое не полностью преобразовалось до монтмориллонита.

Зачастую, бентонитоносные провинции вулканогенно-осадочного генезиса пространственно и генетически связаны с угольными бассейнами. Связь между месторождениями бентонитовых глин и угленосными отложениями объясняется тем, что условия осадконакопления ископаемых углей благоприятны для формирования бентонитовых залежей – морские прибрежные зоны мелководья, лагуны и заливы. Процессы накопления органических остатков прерываются в результате осаднения пеплов. В этом случае прослеживается ритмичное переслоивание пластов угля и бентонитовой глины [Белоусов, Наседкин, 2015; Belousov et al., 2021]. В случае значительного преобладания объема осевшего пеплового материала над объемом органического вещества, pH среды соответствует исходным морским водам и образуются смектиты. В случае преобладания органических остатков, над объемом пеплового материала, pH системы понижается до слабокислых значений pH и образуются тонштейны каолинового состава [Вергунов и др., 2019; Belousov et al., 2021].

Стоит отметить, что вулканогенно-осадочные бентониты неогенового, палеогенового и частично мелового возраста в большинстве случаев встречаются с бурыми углями, тогда как камен-

ноугольные бентониты – с каменными. В целом, бентонитовые глины каменноугольного возраста встречаются реже, что связано с влиянием на них глубокой стадии диагенеза, а в некоторых случаях и начальной стадии метаморфизма. В большинстве случаев такие условия приводят к потере бентонитом способности к набуханию и преобразованию в аргиллиты. Те каменноугольные месторождения бентонита, которые сохранили способность к набуханию приобретают специфические свойства, такие как более высокая плотность, пониженные значения микропористости и величины удельной поверхности. Примером таких бентонитов является месторождение 10-й Хутор [Belousov et al., 2021].

Таким образом, наличие вулканизма в регионе и широкое развитие угольных бассейнов потенциально благоприятно для формирования вулканогенно-осадочных бентонитоносных провинций. Примерами таких провинций можно назвать о. Сахалин (Тихменевское месторождение), Приморский и Хабаровский край, а также республика Хакасия [Белоусов, Крупская, 2019; Белоусов и др., 2022].

Гидротермальные месторождения бентонита связаны с разломами, трещиноватыми вулканогенными и магматическими породами [Петров, 1972; Дистанов, 2000; Белоусов, Крупская, 2019]. 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 туфов и пеплов [Наседкин, Ширинзаде, 2008].

Качественное разнообразие образующихся бентонитов и содержание в них сопутствующих компонентов зависят от состава термальных вод, их температуры и щелочности. Благоприятные условия для преобразования туфов в монтмориллонит создаются при низких (50–200°C) и средних (200–300°C) температурах гидротерм и их повышенной щелочности (pH 8–10) [Дистанов, 2000]. Отличительной чертой бентонитов гидротермального генезиса является наличие постепенных переходов: бентонит ↔ монтмориллонитизированная порода ↔ материнская порода. Также диагностическим признаком является наличие близости магматических горных пород (базальты, андезиты и др.).

Месторождения гидротермального типа приурочены к окраинно-континентальным орогенам с зонами глубоких разломов, на краях континентальных блоков в эпоху активизации гидротермальных процессов в зонах активного вулканизма [Дистанов, 2000]. На данный момент в России не разрабатывается ни одного месторождения бентонита гидротермального типа, однако пред-

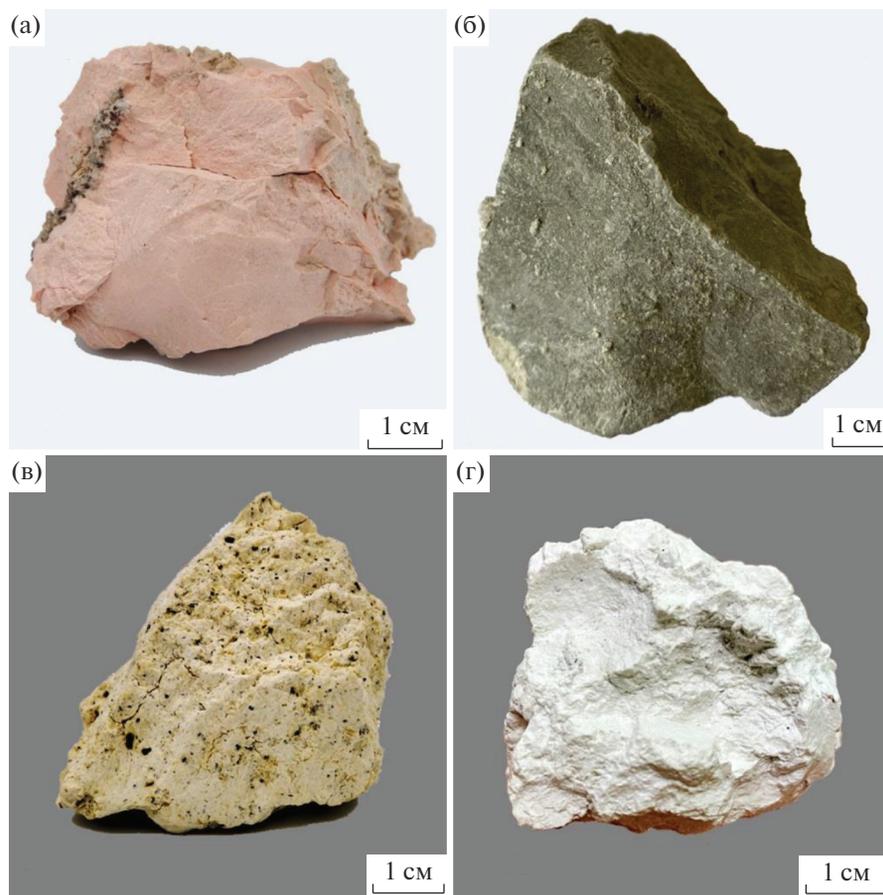


Рис. 2. Фотографии образцов бентонитовой глины вулканогенного происхождения различных месторождений. а – Таганское (республика Казахстан), б – 10-й Хутор (республика Хакасия), в – Даш-Салахлинское (республика Азербайджан), г – Фердос (Иран).

полагается, что в основном они локализованы в Приморском крае.

СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БЕНТОНИТОВ ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНОГО И ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Бентонитовые глины вулканогенно-осадочного и гидротермального типа имеют текстурно-структурные особенности, позволяющие отличить их от глин осадочного генезиса. На основании исследования бентонитов из месторождений различного генезиса были выявлены их отличительные петрографические черты. В большинстве случаев они имеют светлый окрас, встречаются белые, серые, желтые, розовые, красные, зеленоватые и голубоватые разновидности (рис. 2). В сухом виде бентонит довольно крепкий, массивный (см. рис. 2б, г), в некоторых случаях землистый. Встречаются бентониты с тонкослоистой текстурой, связанные в основном с чередованием бен-

тонитовой глины и небольших слоев углистого вещества, и с мелкозернистой текстурой, связанные с примесью сохранившихся остатков материнских пород. В этом случае в образцах наблюдаются включения темноцветных минералов. В зонах с активной тектонической деятельностью наблюдаются бентониты с прожилками, заполненными вторичной минерализацией (см. рис. 2а). В некоторых случаях бентониты унаследуют слабо выраженную текстуру исходных пород, по которым были образованы, например, туфобрекчиевую (см. рис. 2в), что делает их визуальную диагностику в полевых условиях затруднительной. При намокании бентониты становятся мылообразными, липкими и набухают.

Структурные особенности представляют собой важный диагностический признак, позволяющий установить генезис и особенности образования бентонитов. Поскольку, как при гидротермальном процессе, так и при диагенезе, образование монтмориллонита связано с девитрификацией вулканического стекла, полевых шпатов и прочих породообразующих минералов, зачастую в шли-

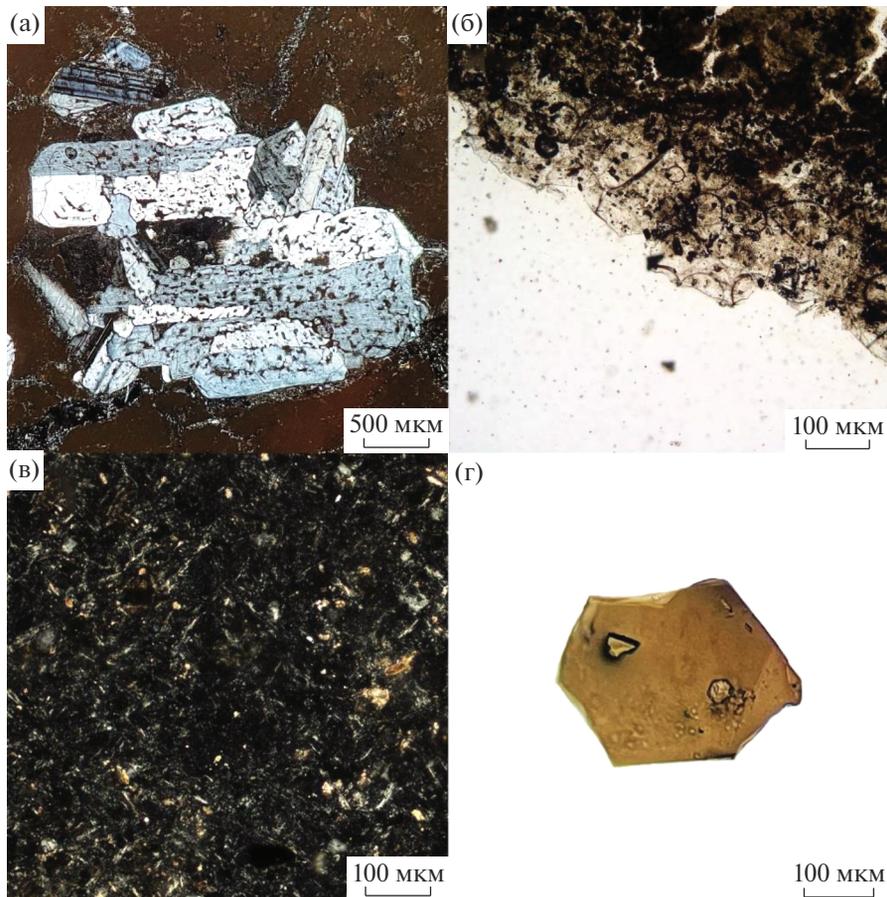


Рис. 3. Микрофотографии бентонитовой глины вулканогенного происхождения. а – зерно полевого шпата с порами выщелачивания (Даш-Салахлинское месторождение); б – перлитовая структура разложения вулканического стекла (Тихменевское месторождение); в – монтмориллонит с пелитовой структурой с включениями зерен полевых шпатов (месторождение 10-й Хутор); г – хорошо раскристаллизованная чешуйка слюды, образовавшаяся в результате гидротермальной деятельности (Даш-Салахлинское месторождение).

фах или отмытых кристаллических фракциях можно наблюдать процессы выщелачивания исходных минералов. На рис. 3а изображен кристалл полевого шпата с порами выщелачивания, подвергшийся интенсивному преобразованию. Такое избирательное выщелачивание может быть связано с зональным строением полевого шпата, и изменением химического состава от центра к периферии. Наглядным примером девитрификации вулканического стекла являются его недоразвоженные остатки с перлитовой структурой (см. рис. 3б). Поскольку вулканическое стекло является менее стабильным в слабощелочных условиях, такие реликты встречаются редко, обычно в отложениях неогенового возраста.

Основная же масса бентонитовых глин под микроскопом имеет пелитовую структуру, с примесью зерен кварца, полевого шпата, слюды и т.п. (см. рис. 3в). В бентонитах гидротермального генезиса нередко наблюдается большое скопление хорошо раскристаллизованных чешуек слюди-стых минералов (см. рис. 2в, 3г).

РУДОКОНТРОЛИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Одними из важных рудоконтролирующих факторов формирования бентонитовых глин вулканогенно-осадочного и гидротермального генезиса являются физико-химические условия среды минералообразования. Для образования смектита необходима слабощелочная среда с рН 7–8, причем, при разложении вулканических пеплов свободная щелочь нейтрализуется, что приводит к необходимости поступления нового щелочного раствора, в большинстве случаев – морской воды [Wilson, 2013]. По этой причине, для образования месторождений бентонитовой глины наиболее приемлема открытая система накопления вулканического материала – заливы, лагуны, прибрежные озера. Также для поддержания благоприятных условий необходим постоянный вынос избытка кремнезема, который образуется при разложении вулканического пепла. В противном случае могут образовываться цеолиты [Marantos, 2011]. Благоприятным фактором является высокое соотношение вода : вулканический

Таблица 1. Минералообразующие системы: бентонитовая глина

Генетические типы	Вулканогенно-осадочный, гидротермальный, осадочный, остаточный
Геотектоническая обстановка	<i>Вулканогенно-осадочные:</i> окраинно-континентальные орогены и прилегающие к ним краевые части платформ в эпоху активного вулканизма; <i>гидротермальный:</i> окраинно-континентальные орогены с зонами глубинных разломов, в эпоху активизации гидротермальной деятельности; <i>осадочный</i> — краевые части платформ и щитов в эпоху стабилизации тектонических движений; <i>остаточный:</i> условия развития платформ в окраинных частях кратонов и окраинно-континентальных орогенов
Палео-географические обстановки	<i>Вулканогенно-осадочные:</i> условия морских и озерных бассейнов, прибрежные шельфовые зоны, лагуны и заливы с проточной водой; <i>гидротермальный:</i> вулканические пояса; <i>осадочный:</i> морские и озерные бассейны платформенного типа; <i>остаточный:</i> суша
Возраст	C ₁ , J, K, Pg, Ng
Материнская порода	Вулканогенные породы, по составу от кислых до основных

Количество месторождений, поставленных на баланс — 38. Балансовые запасы категории А + В + С₁ — 194 млн т.

пепел в системе осаждения материала и высокое значение Mg^{2+}/H^+ (табл. 1).

В российской литературе [Наседкин и др., 2001] было принято считать, что материалом для образования бентонитов служили в основном вулканические породы кислого состава (риолиты, дациты и промежуточные разности). С целью изучения этого вопроса был использован распространенный подход при изучении новообразованных пород гидротермального и вулканогенно-осадочного типа — восстановление состава материнской породы, путем составления диаграмм соотношений химических элементов [Winchester, Floyd, 1977; Spears, Kanaris-Sotiriou, 1979]. Данные диаграммы имеют свои недостатки и ограничения, однако, дают некоторое понимание о типе материнской породы и строятся на основе наименее подвижных элементов, чтобы исключить влияние возможной миграции элементов как из новообразованных глин, так и наоборот. В роли объектов исследования были выбраны хорошо изученные месторождения России и зарубежных стран, образованные в различных геологических обстановках из вулканогенного материала разного состава.

Полученные результаты (рис. 4, табл. 2) свидетельствуют о том, что исходным вулканическим материалом на многих месторождениях бентонитовой глины действительно служат породы кислого состава. Однако, как видно из диаграммы Винчестера и Флойда (см. рис. 4), они могут образовываться, в том числе по породам основного и среднего ряда, что подтверждается значением титанового модуля (см. табл. 2). По составу щелочных элементов, в основном это породы умеренно- и нормально-щелочного ряда.

Таким образом можно сделать заключение, что основным фактором, оказывающим влияние на образование бентонитовых глин, а не других алюмосиликатов, является не состав материнско-

го вещества, а тип бассейна седиментации и физико-химические условия.

Как видно из табл. 2, исходным материалом для образования бентонитовой глины на месторождениях Греции в основном послужили породы трахиандезитового состава. Основная часть месторождений Турции образовались по породам от риолитового до трахитового состава. В образовании месторождений Кипра принимали участие породы андезитового, андезит-базальтового и базальтового состава. Российские месторождения связаны с вулканизмом риолит-дацитового состава (см. рис. 1, табл. 2).

Все изученные месторождения бентонита относятся к нижнекаменноугольному отделу, меловой, палеогеновой, неогеновой системам, в меньшей степени — к юрской (см. табл. 1).

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ БЕНТОНИТЫ ДАШ-САЛАХЛИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В качестве примера бентонитовой глины гидротермального генезиса рассмотрим Даш-Салахлинское месторождение, расположенное в республике Азербайджан, детальные геологические исследования которого проводились В.В. Наседкиным [Наседкин, Ширинзаде, 2008]. Данное месторождение высококачественного бентонита находится в 2 км к западу от с. Даш-Салахлы и 10–12 км к северо-западу от г. Газах, на границе с Республикой Армения.

В геологическом плане месторождение представлено тремя бентонитовыми залежами, локализованными в пределах кальдеры. Палеокальдера связана с развитием верхнемелового вулканизма, приуроченного к северной части Газахского прогиба Малого Кавказа [Наседкин, Ширинзаде, 2008] (рис. 5). Образование кальдеры последовало после мощных эксплозивных извержений из

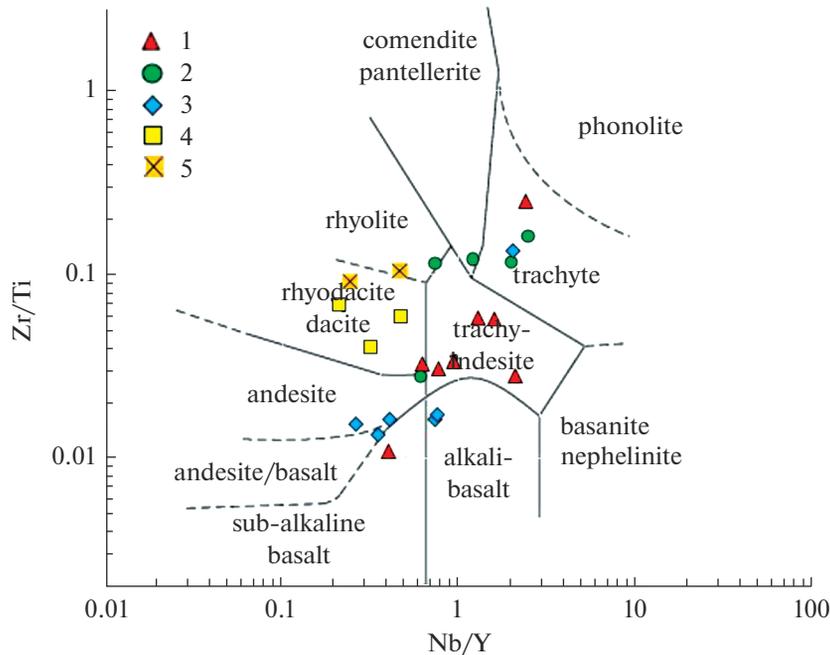


Рис. 4. Состав материнских пород различных месторождений бентонита, восстановленный по диаграмме Д.А. Винчестера и П.А. Флойда [1977].

1–5 — месторождения: 1 — Чиос, Самос, Ферес, Скалома, Сапес (Греция), 2 — Халдере, Еникой, Чагис (Турция), 3 — Поликантос, Скуриотисс, Мони (Кипр), 4 — 10-й Хутор (республика Хакасия), 5 — Тихменевское (Сахалинская обл.).

относительно крупного по масштабу вулканического центра. После проседания ранней кальдерной впадины формировалась система дополнительных разломов, вдоль которых возникли более мелкие вулканические центры, с которыми также связана эксплозивная деятельность. По составу продукты извержения имели кислый состав типа трахидацита и трахириолита. Вблизи вулканических аппаратов отлагался более грубый пирокластический материал и по мере удаления он сменялся более тонкозернистыми разностями. В большинстве случаев пирокластические толщи состояли из обломков вулканического стекла, реликты которого отчетливо заметны во многих разновидностях бентонитов месторождения [Наседкин, Ширинзаде, 2008].

Основание толщи сложено песчаниками, песчанистыми известняками, туфобрекчиями и известняками альбского яруса нижнего мела. Выше следуют песчаники, песчанистые известняки и порфириды сеноман–турона. Далее выше по разрезу залегают порфириды и туфобрекчии турона и коньякского яруса. Основные породы этих ярусов сменяются трахиандезитовыми туфами и туфогенными породами сантона, которые слагают основную часть разреза. Трахиандезитовые туфы в свою очередь локально перекрываются дацитовыми и риолит-дацитовыми туфами, приуроченными к местам выхода экструзивных куполов. Кислые экструзии и связанные с ними пирокла-

стические образования также датируются сантонским ярусом. Общая мощность пирокластических пород андезитов и риолит-дацитов варьирует от 15–20 до 150 м. Сантонские эффузивы и их пирокласты претерпели интенсивную аргиллизацию, связанную с гидротермальными растворами, образовавшимися в результате теплового воздействия вулканических очагов. Данные очаги расположены на глубине 2–3 км. Разрез верхнемеловых отложений венчается известняками кампанского яруса [Наседкин, Ширинзаде, 2008].

В связи с неравномерным распределением отдельных залежей бентонита, площадь распространения бентонитовых глин была разделена на три участка: Центральный, Северный и Южный. Каждый участок представлен обособленным бентонитовым телом, со своими характерными признаками [Наседкин, Ширинзаде, 2008]. Мощность бентонитовых тел варьирует от 10–15 до 100–120 м. Залегание пологое 2°–12°. Данное месторождение можно отнести к одному из крупнейших в мире, доказанные запасы которого в начале его разработки составляли 86 млн т. На данный момент запасы месторождения составляют чуть менее 82 млн т. Высокое качество бентонита определяется содержанием щелочного монтмориллонита от 75 до 85% [Белоусов, 2013; Наседкин, Ширинзаде, 2008]. В виде примесей

Таблица 2. Химический состав и титановый модуль бентонитовой глины различных месторождений

Обр. №	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ППП	Zr	Nb	Y	Ti модуль	Ссылки*
	%										ppm					
CH-5	57.80	12.63	1.22	5.81	5.21	0.50	0.29	0.15	–	0.03	14.30	86.00	40.00	25.00	0.01	
CH-13	65.00	13.24	1.05	2.91	1.47	1.19	0.89	0.13	–	0.01	14.05	75.00	35.00	27.00	0.01	Греция ¹
SM-12	66.05	13.08	1.53	1.94	1.58	0.45	0.41	0.08	–	0.06	14.78	201.00	82.00	34.00	0.01	
SM-15	70.50	9.88	1.30	2.27	1.23	0.62	0.72	0.67	–	0.01	12.72	189.00	59.00	28.00	0.07	
F14/28	56.58	16.46	2.89	1.74	3.81	1.84	2.35	0.56	–	0.05	11.50	189.00	16.00	17.00	0.03	
FPA-209	60.03	16.55	3.65	2.92	2.41	1.70	0.53	0.56	–	0.45	12.31	183.00	10.00	16.00	0.03	
SKA-4/20	58.98	13.77	1.52	2.75	3.50	0.77	0.37	0.31	–	0.21	17.37	95.00	13.00	17.00	0.2	
AP-2A	55.75	17.81	6.56	2.54	0.67	0.42	2.76	0.81	–	0.06	12.03	89.00	8.00	20.00	0.05	
CLD-4	52.54	15.23	1.49	5.85	1.33	0.11	0.24	0.07	<0.01	<0.01	23.00	112.80	22.90	9.20	0.00	Турция ²
CLD-11	50.70	15.01	1.69	6.60	2.00	0.05	0.32	0.10	0.02	0.02	23.30	114.10	21.00	28.00	0.01	
YNK-10	57.51	17.62	6.02	1.39	0.02	0.04	2.91	0.73	0.06	0.01	13.50	201.50	14.20	23.20	0.04	
CGS-7	51.79	14.04	1.55	6.95	1.29	0.06	0.24	0.09	0.01	<0.01	23.80	104.60	18.70	9.40	0.01	
CGS-13	51.45	14.81	1.52	5.64	1.97	0.05	0.19	0.09	0.01	0.04	24.10	108.30	20.30	16.70	0.01	
1	73.20	10.12	4.56	2.20	0.95	0.97	1.52	0.59	0.36	0.06	4.50	90.40	10.30	39.70	0.06	Кипр ³
3	59.54	22.21	3.20	3.68	0.98	1.52	0.55	0.19	0.09	0.08	6.89	257.50	12.20	6.00	0.01	
6	64.02	13.38	7.30	2.81	1.17	1.56	1.83	0.55	0.39	0.18	6.35	90.00	19.00	26.00	0.04	
13	71.52	10.57	5.51	2.47	0.97	1.48	1.49	0.63	0.20	0.14	4.24	102.50	13.20	32.50	0.6	
14	69.51	11.43	5.75	2.70	0.98	1.58	1.66	0.67	0.22	0.13	4.60	90.90	12.50	36.10	0.6	
15	63.49	14.75	7.05	2.30	1.65	0.60	2.19	1.21	0.20	0.11	5.87	211.20	24.90	32.90	0.08	
2B	72.09	11.69	2.14	1.60	0.64	1.18	2.02	0.53	0.09	0.05	7.77	312.00	16.00	34.00	0.05	Россия ^{4,5}
2C	54.49	16.87	3.56	2.85	3.58	1.04	1.00	0.54	0.24	0.03	15.55	370.00	21.00	99.00	0.03	
6A	51.86	14.37	9.99	2.40	5.85	1.30	1.41	0.65	0.28	0.60	11.08	263.00	15.00	47.00	0.05	
3/1	67.12	13.73	2.47	2.73	0.60	1.30	0.24	0.09	<0.01	0.01	11.67	82.00	9.00	37.00	0.01	
6/1	71.65	10.52	1.96	1.96	0.59	1.35	0.25	0.10	<0.01	0.01	11.58	105.00	12.00	26.00	0.01	
6/2	70.44	14.38	1.69	1.86	0.67	1.69	0.31	0.15	<0.05	<0.01	8.73	–	–	–	–	

Примечание. Ссылки* – 1 – [Koutsopoulou et al., 2016]; 2 – [Kadir et al., 2019]; 3 – [Christidis, 2006]; 4 – [Belousov et al, 2021]; 5 – [Белоусов, Наседкин, 2015].

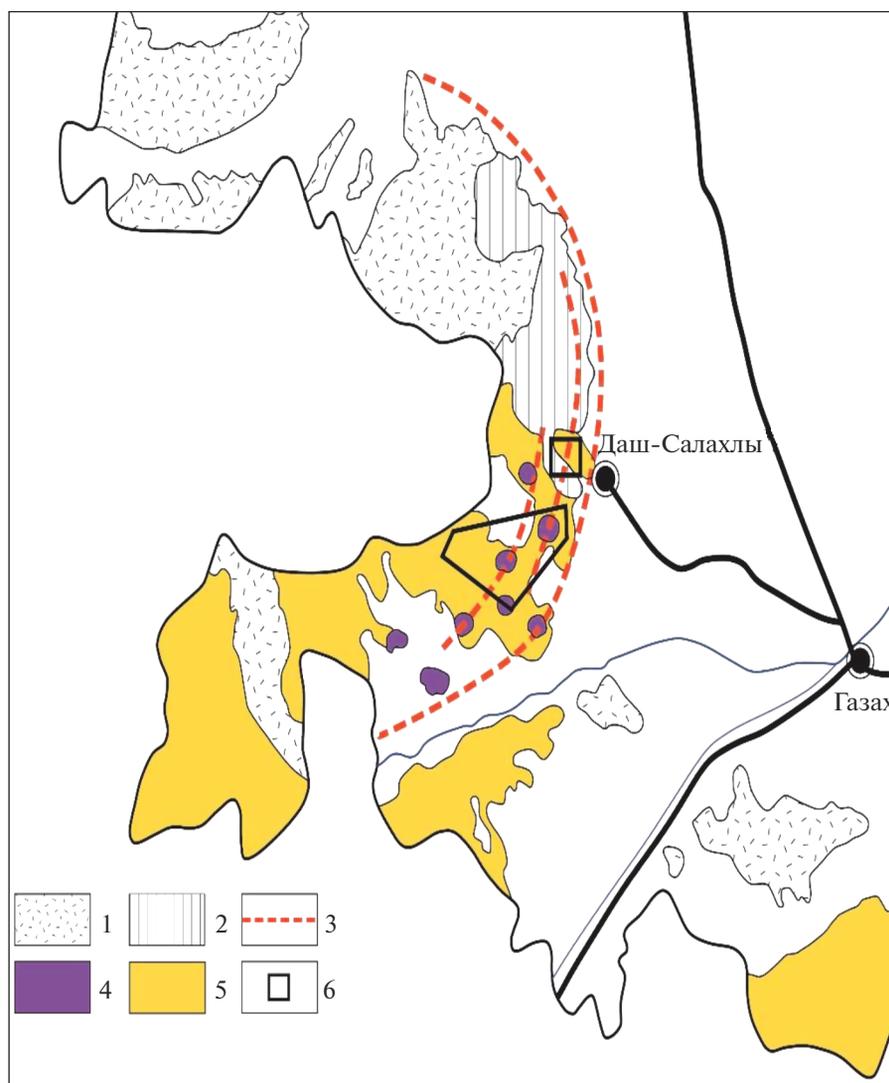


Рис. 5. Схематическая карта дочетвертичных отложений строения Газахского прогиба (по [Наседкин, Ширинзаде, 2008] с упрощениями).

1 – трахиандезиты, трахибазальты, трахиандезитовые туфы, андезиты; 2 – глины, песчаники, известняки; 3 – тектонические разломы; 4 – риолит-дацитовые экструзивы; 5 – аргиллитизированные туфы и бентонитовые глины; 6 – отработываемые участки Даш-Салахлинского месторождения.

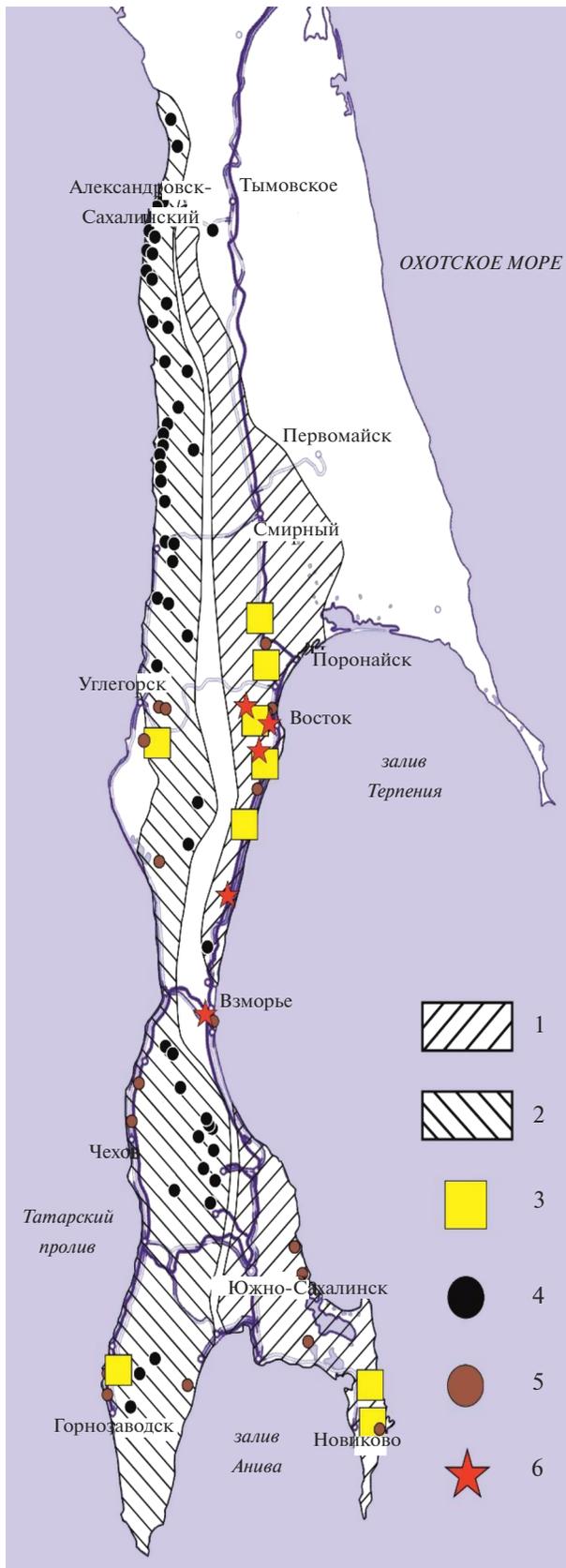
присутствуют кварц и полевой шпат, кристобалит, кальцит, слюда.

На основании структурно-текстурных особенностей и минерального состава были выделены следующие группы разновидностей бентонитов Даш-Салахлинского месторождения [Наседкин, Ширинзаде, 2008]: а) однородные, массивные зеленые и желтые бентониты со слабовыраженной туфобрекчиевой текстурой (см. рис. 2в); б) грубослоистые агломератовые бентониты грязно-зеленого цвета с щелевидными тонкими порами в обломках; в) тонкослоистые светло-зеленые бентониты; г) грубообломочные бентониты; д) брекчиевые бентониты с примесью биотита; е) известковистые песчано-алевритовые бентониты. Состав материнских по-

род в данном случае не обязательно определять геохимическими методами, поскольку в большинстве случаев они граничат с бентонитовыми толщами или представлены в переходных зонах.

ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНЫЕ БЕНТОНИТЫ О. САХАЛИН

Месторождения бентонитовой глины о. Сахалин относятся к вулканогенно-осадочному типу и являются хорошим примером для рассмотрения парагенетических связей и рудоконтролирующих факторов, предложенных в данной статье. Бентонитовосность о. Сахалин генетически связана с миоценовыми туфо-осадочными угленосными



←
Рис. 6. Карта распространения месторождений и проявлений угля и бентонитовой глины на южной части о. Сахалин. 1 – Центрально-Сахалинский каменноугольно-буроугольный бассейн; 2 – Западно-Сахалинской каменноугольный бассейн; 3 – месторождения и проявления бентонитовой глины; 4 – месторождения каменного угля; 5 – месторождения бурого угля; 6 – установленные центры миоценового вулканизма.

отложениями верхнедуйской, реже, нижнедуйской свитами миоценового возраста [Белоусов, Наседкин, 2015; Белоусов, Крупская, 2019]. 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: условия морских и озерных бассейнов, прибрежные шельфовые зоны, лагуны и заливы 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. 6). Их местоположение в настоящее время фиксируется по вскрытым эрозией корневым частям вулканических аппаратов. Как было установлено [Белоусов, Наседкин, 2015; Белоусов, Крупская, 2019], 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 монтмориллонит.

Как видно из рис. 6, на территории Сахалина наблюдаются два крупных угольных бассейна, Центрально-Сахалинский и Западно-Сахалинской, в пределах которых и расположены основные месторождения каменного и бурого угля. Основная часть крупных месторождений бентонита приурочена к Центрально-Сахалинскому бассейну, и расположена внутри буроугольных бассейнов. Пласты бентонита залегают как в подошве, так и кровле буроугольных отложений.

Наиболее детально изучены месторождения и проявления центрального Сахалина, расположенные вдоль восточного побережья, а именно Тихменевское, Вахрушевское, Макаровское, Леонидовское, общие ресурсы которых составляют порядка 5 млн т [Меренков, 2002; Белоусов, Крупская, 2019]. 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 монтмориллонита в данных месторождениях составляет 60–80%. В некоторых случаях попадаются образцы с содержаниями более 90%. По составу обменного комплекса вы-

деляются как щелочные, так и щелочноземельные бентониты.

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

На юго-западном побережье Сахалина расположена серия месторождений и проявлений бентонита. Они также приурочены к буроугольному 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 монтмориллонита достигает 60–80%, мощность пластов не выдержана и колеблется от 1 до 10 м. Как и в других случаях, бентониты приурочены к буроугольному месторождению.

Несмотря на то, что остров Сахалин представляет собой бентонитоносную провинцию [Сабитов и др., 2007; Белоусов, Наседкин, 2015], сложные геологические условия залегания пластов бентонитовой глины, а также эксплуатация буроугольных месторождений создает определенные сложности для разработки разведанных месторождений и к настоящему моменту добыча бентонитового сырья на острове не ведется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Месторождения высококачественного бентонита связаны с вулканизмом и образуются в результате разложения вулканогенных и магматических пород под действием слабощелочных морских вод и гидротерм. По условиям образования они делятся на вулканогенно-осадочные и гидротермальные.

Вулканогенно-осадочные бентониты формируются путем подводного преобразования вулканических пеплов и туфогенного материала в слабощелочных условиях прибрежных частей морей, заливов, лагунах и озерах с дальнейшим уплотнением и трансформацией на стадии диагенеза. Одним из важнейших поисковых признаков вулканогенно-осадочных бентонитов является наличие угольных отложений. Гидротермальные месторождения бентонита связаны с разломами, трещиноватыми вулканогенными и магматическими

породами. Бентониты образуются за счет гидротермального преобразования туфов и пеплов. Бентонитовые глины вулканогенно-осадочного и гидротермального типа в основном имеют светлый окрас, встречаются белые, серые, желтые, розовые, красные, зеленоватые и голубоватые разности.

Проведенные исследования показали, что состав материнского вещества необходимый для образования бентонитов, представлен породами широкого состава, от базальтов до риолитов. При этом, основным фактором, оказывающим влияние на образование бентонитовых глин, а не других алюмосиликатов, является не состав материнского вещества, а тип бассейна седиментации и физико-химические условия.

Рассматривая геологическую позицию и благоприятные условия образования бентонитов вулканогенного происхождения можно сделать заключение, что наиболее перспективными регионами распространения высококачественного бентонита является Дальний Восток, а именно о. Сахалин, Приморский, Забайкальский, Хабаровский и Магаданский край.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Статья подготовлена в рамках темы Госзадания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоусов П.Е., Крупская В.В.* Бентонитовые глины России и стран ближнего зарубежья // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 3. С. 79–90. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.79-90>
- Белоусов П.Е.* Сравнительная характеристика месторождений высококачественных бентонитов России и некоторых зарубежных стран // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2013. № 2. С. 55–61.
- Белоусов П.Е., Наседкин В.В.* Генезис и особенности условий образования бентонитов Тихменевского месторождения (о. Сахалин) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2015. № 2. С. 45–51.
- Вергунов А.В., Арбузов С.И., Соболенко В.М.* Минералогия и геохимия тонштейнов в углях Бейского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 2. С. 155–166.
- Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации: “Глины Бентонитовые”, 2019; “Глины для буровых растворов”, 2019; “Формовочные материалы”, 2019.
- Дистанов У.Г.* Фанерозойские осадочные палеобассейны России: проблемы эволюции и минерогенеза неметаллов. М.: Геоинформатика, 2000. С. 83–96.
- Кирсанов Н.В.* Сырьевая база бентонитов СССР и их использование в народном хозяйстве (Генетическая классификация и закономерности размещения бентонитовых глин). М.: Недра, 1972. С. 39–55.
- Меренков А.М.* Полезные ископаемые Сахалинской области. Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное изд-во, 2002.
- Наседкин В.В., Кваша Ф.С., Стаханов В.В.* Бентониты в промышленности России. М.: ГЕОС, 2001. 236 с.
- Наседкин В.В., Ширинзаде Н.А.* Даш-Салахлинское месторождение бентонита. Становление и перспективы развития. М.: ГЕОС, 2008. 85 с.
- Петров В.П.* Сырьевая база бентонитов СССР и их использование в народном хозяйстве. М.: Недра, 1972. 288 с.
- Сабитов А.А., Конюхова Т.П., Трофимова Ф.А. и др.* Бентониты Сахалина // Разведка и охрана недр. 2007. С. 16–21.
- 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. V. 215. № 1. P. 1–14.
- Christidis G.E., Huf W.D.* Geological Aspects and Genesis of Bentonites // Elements. 2009. № 5. P. 93–98.
- Christidis G.E.* Genesis and compositional heterogeneity of smectites. Part III: Alteration of basic pyroclastic rocks – A case study from the Troodos Ophiolite Complex, Cyprus // American Mineralogist. 2006. V. 91. № 4. P. 685–701. <https://doi.org/10.2138/am.2006.2001>
- Kadir S., Klah T., Erkoyun H. et al.* Geology, Mineralogy, Geochemistry, and Genesis of Bentonite Deposits in Miocene Volcano–Sedimentary Units of the Balikesir Region, Western Anatolia, Turkey // Clays and Clay Minerals. 2019. V. 67 № 5. P. 371–398. <https://doi.org/10.1007/s42860-019-00029-w>
- Koutsopoulou E., Christidis G.E., Marantos I.* Mineralogy, geochemistry and physical properties of bentonites from the Western Thrace Region and the islands of Samos and Chios, East Aegean, Greece // Clay Minerals. 2016. V. 51. № 4. P. 563–588. <https://doi.org/10.1180/claymin.2016.051.4.03>
- Marantos I., Christidis G.G., Ulmanu M.* Zeolite formation and deposits. Handbook of Natural Zeolites. 2011. 19–36.
- Odin G.S., Matter A.* De Glauconiarum Origine // Sedimentology. 1981. V. 28. P. 611–641.
- Spears D.A., Kanaris-Sotiriou R.* A geochemical and mineralogical investigation of some British and other European tonsteins // Sedimentology. 1979. V. 26. P. 407–425.
- Wilson M.J.* Rock-forming minerals. Sheet silicates: clay minerals // The Geological Society. 2013. V. 3C. P. 736.
- Winchester J.A., Floyd P.A.* Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // Chem. Geol. 1977. V. 20. P. 325–343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)

Volcano-Sedimentary and Hydrothermal Deposits of Bentonite Clay

P. E. Belousov^{1, *} and N. D. Karelina¹

¹*Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: pitbl@mail.ru*

This work is devoted to the study of bentonite clays of volcanogenic origin. The geological and structural position of deposits, paleogeographic conditions of sedimentation, structural and textural features of rocks and their diagnostic features are considered. Ore-controlling factors for the formation of bentonites of volcanic origin have been identified. A comparative analysis of the initial volcanogenic material of deposits in Russia and foreign countries has been carried out. On the example of the Dash-Salakhinskoe deposit (rep. Azerbaijan) and the bentonite-bearing province of Sakhalin Island the features of the formation of hydrothermal and volcanogenic-sedimentary bentonites are shown. The composition of the parent material during the formation of bentonites varies widely from rocks of basalt to rhyolite composition. In this case, the main factor determining the formation of bentonites is not the composition of the parent material, but the type of sedimentation basin and physicochemical conditions.

Keywords: bentonite, mineral-forming systems, volcanism, diagenesis, hydrothermal processes