

ЛИТОЛОГИЯ

УДК 552.53

Онтогенез эвапоритов**И. И. Чайковский, Т. А. Уткина, М. В. Бубнова**

Горный институт УрО РАН

614007, Пермь, ул. Сибирская, 78А. E-mail: ilya@mi-perm.ru

(Статья поступила в редакцию 02.02.2026 г.)

Охарактеризованы основные механизмы карбонатной, сульфатной и хлоридной эвапоритовой седиментации (в виде «лодочек» и корок на поверхности водоема, в толще рапы, на дне (в т.ч. в условиях активной волновой деятельности), а также внутри осадка). Показано вовлечение эвапоритов в процесс эндогенного минерало- и породообразования, а также их трансформация при миграции через них растворов различной минерализации. Отмечено, что разрушение эвапоритов приводит не только к накоплению остаточного материала, но и значительной химической перегруппировке вещества с образованием дифференцированных кор выветривания.

Ключевые слова: *эвапориты, механизмы седиментации, диагенез, гипергенез.*

DOI: 10.17072/psu.geol.25.2.184

Введение

Биологический термин «онтогенез» в минералогию ввел профессор Ленинградского Горного института Д. П. Григорьев (1961), который вслед за биологами понимал под ним изменения, претерпеваемые индивидами и агрегатами в процессе зарождения, изменения и разрушения.

Эвапориты представляют собой химические осадки, кристаллизующиеся в результате испарения (сгущения) морской или озерной воды и осаждающиеся из нее согласно увеличению их растворимости (по М. Г. Валяшко (1962): кальцит → доломит → гипс → ангидрит → галит → эпсомит → сильвин → карналлит → бораты). При этом концентрация отдельных компонентов в растворе изменяется от десятых до сотен граммов на дециметр кубический. Различия в растворимости и концентрациях, характере кривых растворения, температурном режиме, а также разнообразие природных обстановок обуславливают многообразие форм возникновения зародышей эвапоритовых минералов, их трансформацию и разрушение.

Седиментация, диагенез и катагенез эвапоритов

Хемотропные карбонаты осаждаются в виде пелитоморфного материала, который в зоне волновой активности агрегируется в оолиты (рис. 1 а, б). В морских обстановках они представлены арагонитом или высокомагнезиальным кальцитом (Лидер, 1986), а при достаточно высоком содержании магния в растворе – доломитом, что видно на примере карбонатных пачек иренского горизонта кунгурского яруса, переслаивающихся с гипсовыми (Уткина и др., 2025). Немалое влияние на форму осаждения карбонатов оказывают и цианобактериальные маты, формирующие разнообразные строматолитовые постройки.

Выявленные специфические структуры в карбонатах удачининской свиты нижнего-среднего кембрия (рис. 1 в) позволяют предполагать нетипичный для седиментационных карбонатов способ образования – донный рост в виде кристаллических кор мощностью 1–7 см. В настоящее время они сложены мелкозернистым агрегатом кальцита или доломита, однако в их строении выделяются

© Чайковский И. И., Уткина Т. А., Бубнова М. В., 2026



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

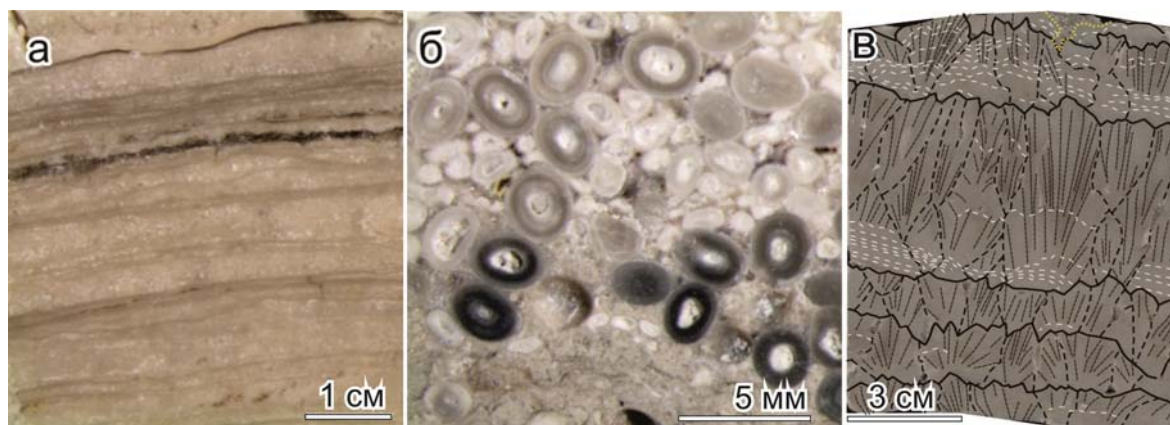


Рис. 1. Седиментационные эвапоритовые карбонаты: а, б – тонкослоистый пелитоморфный (а) и массивный оолитовый (б) доломит (неволинская пачка иренского горизонта кунгурского яруса, Кунгурская Ледяная пещера); в – доломит, в строении которых выделяются многослойные апоарагонитовые коры, сложенные расщепленными индивидами и гнездовыми обособлениями (желтый пункт) оолитов (верхи удачининской свиты нижнего-среднего кембрия, г. Удачный)

слои, представленные расщепленными кристаллами, типичными для арагонита. Зафиксированные между ними цепочки линейных и гнездовых обособлений оолитов позволяют говорить как о каркасообразующей роли арагонита, так и его донном росте. Эти образования появляются в разрезе после водорослево-хемогенных известняков, обломочных и оолитовых доломитов, которые отражают обмеление бассейна и переход от шельфовых отложений сначала к рифовым, а затем и карбонатной платформе (шельфовой лагуне) с повышенной соленостью.

В настоящее время в морских условиях арагонит осаждается в районе Багамских островов, Персидском заливе, Мертвом море в виде игольчатых кристаллов размером несколько микрон (Лидер, 1986). Представляется, что кристаллизация изученного арагонита происходит не столько из-за ингибирующего действия ионов магния, блокирующих рост кальцита, сколько из-за высокой температуры рапы в пересыщенном мелководном бассейне с повышенной концентрацией стронция. Максимальное содержание последнего в соленой воде отвечает смене доломитовой садки гипсовой (Виноградов, Боровик-Романова, 1945).

В диагенетическую стадию эвапоритовые карбонаты могут частично или полностью перекристаллизоваться, однако наиболее значимые изменения происходят на стадии катагенеза, когда карбонатные толщи взаимодействуют с растворами различной мине-

рализации. Примером проявления такого процесса могут служить Саткинские магнетитовые месторождения (Крупенин, 2025), сформировавшиеся за счет миграции захороненных магниевых рассолов через рифейские доломитовые толщи. Структурно-текстурный анализ (рис. 2) показывает, что формирование большинства магнетитовых индивидов связано с диффузией восходящих вод, приведшей к образованию прожилков перекристаллизации гребенчатого строения с субвертикальной ориентировкой растущих снизу вверх индивидов. Этот процесс осложнялся как послойной инфильтрацией растворов, благоприятные условия для которой обусловлены тонкослоистым строением протолита, так и нисходящими водными потоками (в пределах отдельных слоев и их пакетов), связанными с расслоением толщи в результате замещения доломита магнезитом с меньшим (на 11,5 %) объемом элементарной ячейки. За счет разнонаправленной инфильтрации растворов возникли участки с двумя преобладающими направлениями ориентировки индивидов магнезита. Строение магнетитовых пород осложнено крупными метакристаллами и сферолитами, сформированными в результате локальной перекристаллизации, полостями выщелачивания с последующей инкрустацией, а также послойными сдвиговыми синрудными деформациями, приведшими к появлению «бурундучной» текстуры.

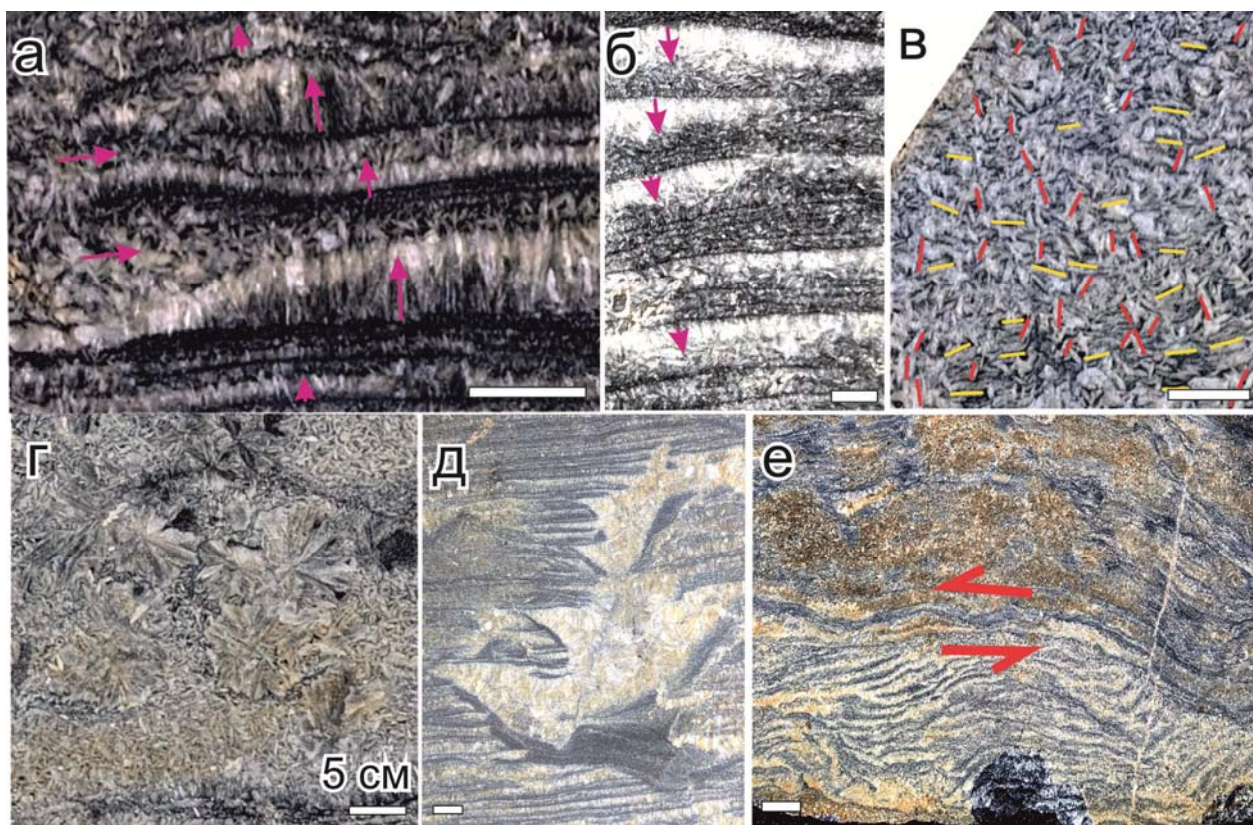


Рис. 2. Особенности строения магнезитовых пород Саткинской группы месторождений: а, б – метакристаллы магнезита, образованные из восходящих ($\uparrow$), послойно ($\rightarrow$) мигрирующих диффузионных растворов и зонах отслоения ($\downarrow$); в – интерференционный рисунок, связанный с различной ориентировкой индивидов магнезита, образованных при послойной и поперечной инфильтрации; г – метасоматические сферолиты; д – бывшая полость выщелачивания с некарбонатным материалом на дне и магнезитовой инкрустацией на стенках; е – «бурундучная» текстура, сформировавшаяся на фоне послойных сдвиговых деформаций. Масштабная линейка равна 5 см

Исследование сульфатных пачек кунгурского и уфимского ярусов Пермского Прикамья позволило (Уткина и др., 2025) реконструировать седиментационный цикл: от постепенного увеличения минерализации рапы до ее опреснения, связанного с привнесом в бассейн поверхностными водами глинисто-карбонатного материала (рис. 3). В условиях относительно низкой минерализации на дне бассейна кристаллизовались крупные (до 30 см) параллельно-шестоватые агрегаты, состоящие из сдвойнированного гипса. Схожие агрегаты гипса длиной 0,1–7 м отмечены и в четвертичных отложениях соляного озера Марион (Австралия) (Warren, 1982). Последующее пересыщение вод привело к массовой садке тонкозернистого гипсового/бассанитового материала с ярко выраженной слоистой текстурой.

Появление в осадке глинисто-карбонатного материала способствовало

пространственной перегруппировке сульфата с образованием диагенетических тонкозернистых желваков ангидрита изометричной или коралловидной формой. В осадке, полностью состоящем из глинисто-карбонатного материала, на стадии диагенеза из поровых вод образуются желваки ангидрита и метакристаллы гипса.

В условиях жаркого климата диагенетические агрегаты пойкилитового гипса формируются в зоне капиллярного поднятия и испарения минерализованных вод, известные как пустынные розы, или «репетекский гипс» (Шванов, 1987). Таким же образом могут формироваться гнезда и целые горизонты сульфатных и хлоридных солей (мирабилит, тенардит, эпсомит, галит и др.). В условиях гумидного климата за счет такого механизма в почвах формируются скопления и целые горизонты, сложенные микронными волокнами кальцита (Verrecchia, Verrecchia, 1994).

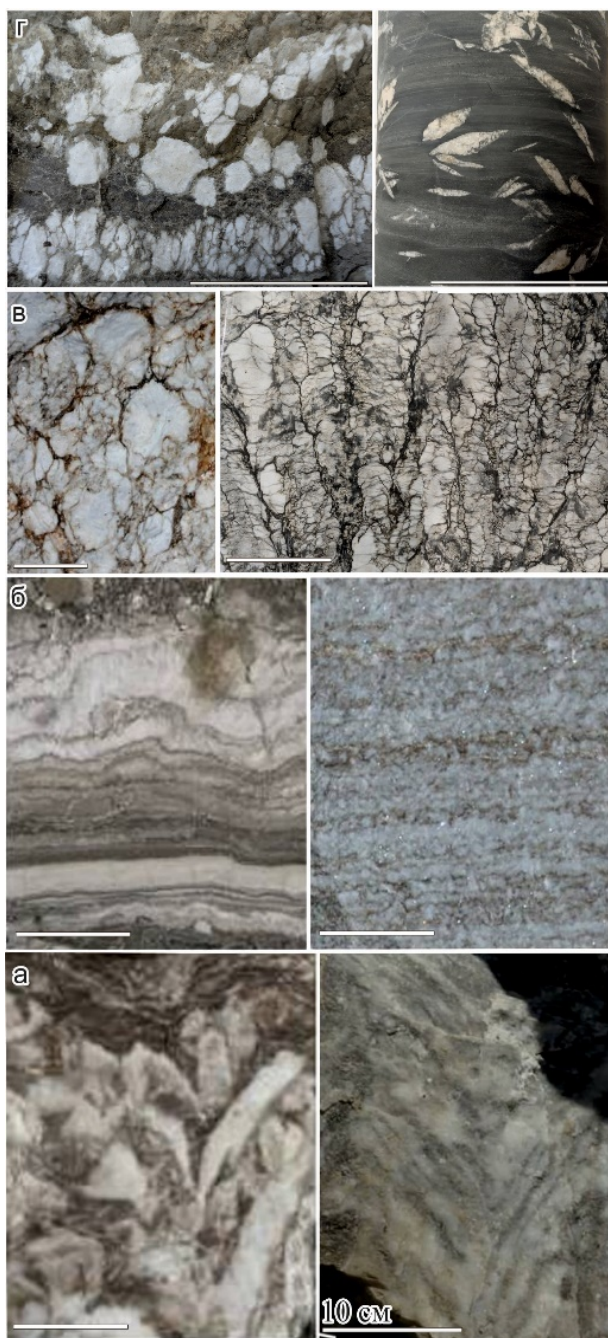


Рис. 3. Генерализованный тренд осаджения сульфата кальция (снизу-вверх) в пределах седиментационного цикла кунгурского и уфимского ярусов Пермского Прикамья: а – донные двойники кристаллов гипса; б – слоистый агрегат гипса/ангидрита; в – изометричные и коралловидные желваки диагенетического ангидрита с интерстициальным глинисто-карбонатным материалом; г – диагенетические желваки ангидрита и метакристаллы гипса в мергеле. Масштабная линейка равна 10 см

Попытки генетической типизации галитовых осадков предпринимались неоднократно (Гаркема, 1894; Валяшко, 1952; Warren,

2016). Анализ литературных данных, особенностей морфологии зерен галита, а также положение в годовом седиментационном цикле позволяют говорить о том, что кристаллизация галита происходит на поверхности и внутри рапы, на дне бассейна, в том числе в условиях активной волновой деятельности, а также внутри осадка (рис. 4).

На границе раздела «воздух – рапа» кристаллизуются так называемые «лодочки» – скелетные реберные воронкообразные кристаллы квадратной (реже дитригональной) формы размером до 10 см. Их образование на поверхности насыщенного раствора отмечалось еще Д. И. Менделеевым в 1869 г. В первозданном виде они хорошо сохраняются при погружении в глинистый или глинисто-карбонатный осадок. В соляном осадке под тяжестью вышележащих отложений они раскалываются, уплотняются и слагают слои незначительной мощности из субпараллельно ориентированных обломков.

Образование зародышей в толще рапы во взвешенном состоянии за счет пересыщения рассола в холодное время года предполагается для мелких зерен галита (Уразов, 1932), которые, погружаясь на дно, слагают зернистую соль. В западной литературе их называют кумулятивными образованиями (Lowenstein, Hardie, 1985).

Кристаллизация галита на дне солеродного бассейна была обоснована В. А. Вахрамеевой (1956) для друзовидных агрегатов и щеток, сложенных крупными (до 3–7 см) кристаллами, характеризующимися зональным строением за счет газово-жидких включений вдоль плоскостей роста. Эти образования называют «перистым», или «шевронным, галитом». На Верхнекамском месторождении выделяется два типа донного галита (ранний серый и поздний белый), которые, как правило, разделены тонким (до 2 мм) слойком глинистого материала. Их образование связывается с ростом в летний период (Уткина, Чайковский, 2026) и отмечается во всех современных соляных озерах.

В условиях активной волновой деятельности зерна галита обрастают новыми слоями и формируют оолиты и пизолиты (Tekin et al., 2007). В настоящее время они фиксируются в прибрежной зоне Мертвого моря и Нидерландских Антильских островов.



Рис. 4. Морфологические типы кристаллов и агрегатов галита: а-в – «лодочки», образовавшиеся на поверхности водоема (а), затонувшие на дне (б) и их отпечатки в мергеле (Верхнекамское месторождение, разрез «Чусовская стрелка»); г – пизолиты (Мертвое море), сформированные за счет концентрического роста в гидродинамически активной среде; д-е – основные генетические типы галита Верхнекамского месторождения (ДГс – донный галит серый; ДГб – донный галит белый, КГ – кумулятивный галит); ж-и – метакристаллы, выросшие в осадке (ж – коралловидные постройки; з – одиночные в ангидрите; и – скелетные в мергеле) (Верхнекамское месторождение солей). Масштабная линейка равна 1 см

Рост в сульфатном или глинисто-карбонатном осадке предполагается для метакристаллов. В случае незначительного количества несолевого материала растущие кристаллы галита «раздвигают» осадок и

приобретают многоэтажную и расщепленную коралловидную форму. В зернистой ангидритовой «каше» растущие метакристаллы приподнимают кровлю и формируют по бокам пойкилитовые «хвосты». В малопрони-

цаемом глинистом субстрате гладкогранные метакристаллы могут со временем перерастать в скелетные.

Исследование современных водоемов, в том числе техногенных, показывает, что галит может кристаллизоваться и в аэральной обстановке из капиллярной пленки поступающего снизу рассола (высолы). Он представлен кристаллами и щетками, иногда с оплывшей поверхностью. В субаэраль и мелководной обстановках происходит криогенная кристаллизация гидрогалита (Чайковский, Долгих, 2007) в виде кристаллических кор, плотин (гур), примыкающих к берегу корок дендритовидного строения на поверхности мелких водоемов, а также игольчатых кристаллов, вырастающих в снег из капиллярных растворов (рис. 5). Схожесть с последними характерна для мирабилита, образующегося в холодное время года на мелководье соляного озера в Юньчэне провинции Шаньси на севере Китая. Все эти обособления, формирующиеся в аэральных условиях, являются сезонными (эфмерными) и не образуют каких-либо залежей. Однако в континентальных озерах в присутствии льда откладываются залежи криогенных кумулятивных минералов-кристаллогидратов. Это сода $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, гидрогалит $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, антарктицит $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Кашкаров, 1956). В течение зимы мощность формирующейся залежи кумулятивного мирабилита в озере Селитренное (с управляемым водопритокотом из озера Кучук) достигает более метра.

Образование сильвина в техногенных бассейнах отмечено на затравках в виде октаэдрических и кубооктаэдрических кристаллов, на поверхности рассола – в виде игольчатых кристаллов (Чайковский и др., 2006), однако в природе реализуется только один механизм – зарождение микрокристаллов в толще рапы при снижении ее температуры в осенне-зимнее время с формированием кумулятивного осадка (рис. 6). Такой же механизм используется для галургического извлечения хлорида калия из рассола (Уразов, 1932).

В толще Верхнекамского месторождения зафиксированы разнообразные формы выделения карналлита. «Бочонковидные» кри-

сталлы, формирующие щетки и друзовидные агрегаты, связывались В. А. Вахрамеевой (1956) с донной кристаллизацией в весенне-летнее время. Анализ структур и их положение в годовом слое позволили выделить еще несколько типов карналлитовой минерализации. Установлено, что в процессе роста донные «бочонковидные» кристаллы могут расщепляться и перерастать в друзовидные агрегаты. Мелкозернистые карналлититы, залегающие ниже зимнего кумулятивного галита, также связываются с формированием зародышей в толще рапы при ее охлаждении. Выявленные разноориентированные фрагменты кор шестоватого строения сопоставляются с корочками карналлита, сформированными на поверхности рапы и затем регенерированными на дне. Предполагается, что различно ориентированные пластинчатые (до 2 см) кристаллы с пинакоидальным габитусом, зафиксированные в кумулятивном мелкозернистом галите, представляют собой метакристаллы, сформировавшиеся на стадии диагенеза.

В процессе взаимодействия карналлитовых пластов с восходящими элизионными или нисходящими лагунными водами, которые характеризуются относительно низкой минерализацией, происходит вынос магния и образование вторичных (апокарналлитовых) сильвинитов. На Верхнекамском месторождении это пестрые сильвиниты, принимающие участие в строении куполообразных зон выщелачивания, а на Гремячинском и Петриковском месторождениях Прикаспия – верхние части карналлитовых пластов. Образовавшиеся хлор-магниевого раствора выщелачивания, отжатые в выщележащую толщу доломитов Гремячинского месторождения, приводят к образованию специфических серпентин-магнезитовых метасоматитов.

Эвапориты в эндогенном процессе

Практически все гидротермальные месторождения золота, меди, свинца, цинка сформировались из хлоридных растворов, однако их связь с эвапоритами далеко не очевидна. Более явная связь с эвапоритами отмечена в различных месторождениях Восточно-Сибирской платформы и ее обрамления.



Рис. 5. Эфемерные хлориды и сульфаты: а-в – криогенный гидрогалит, кристаллизующийся из рассолов, разгружающихся из под отвала БКРУ-1 (а – коры и гуры, б – игольчатые кристаллы, врастающие в снег из капиллярных растворов, в – корочка с дендритовидным строением на поверхности водоема,); г – криогенный мирабилит, кристаллизующийся на дне и дорастающий из капиллярной пленки на мелководье соляного озера в Юньчэне (провинции Шаньси, Китай; фото агентства Синьхуа); д – толща отложившегося зимой криогенного кумулятивного мирабилита (Селитренное озеро, Алтай); е, ж – кристаллы-высолы галита, на берегу соленого ручья. Масштабная линейка равна 20 см

Изотопный состав серы магматических сульфидов норильской группы месторождений сопоставим с таковым осадочных ангидритов, присутствующих во вмещающей толще, что указывает на связь оруденения с ассимиляцией эвапоритов (Годлевский, Грищенко, 1963). Ангидрит присутствует в виде кристаллов и ксенолитов в самих магматах, рудах (сидеронитовых) и гидротермальных образованиях.

В кимберлитовой трубке Интернациональная, прорывающей нижекембрийские эвапориты, зафиксированы различные взаи-

моотношения с каменной солью и галитом, что отражает их длительное взаимодействие: от инъекционной стадии до гидротермальной (рис. 7). Вероятно, наиболее ранним является внедрение кимберлитового материала в размягченную за счет нагрева каменную соль в виде неправильных апофиз и стустков. Присутствие каменной соли в кимберлитовой трубке в виде остроугольных ксенолитов говорит об отсутствии реакционных взаимоотношений между ними и чисто механическом захвате.

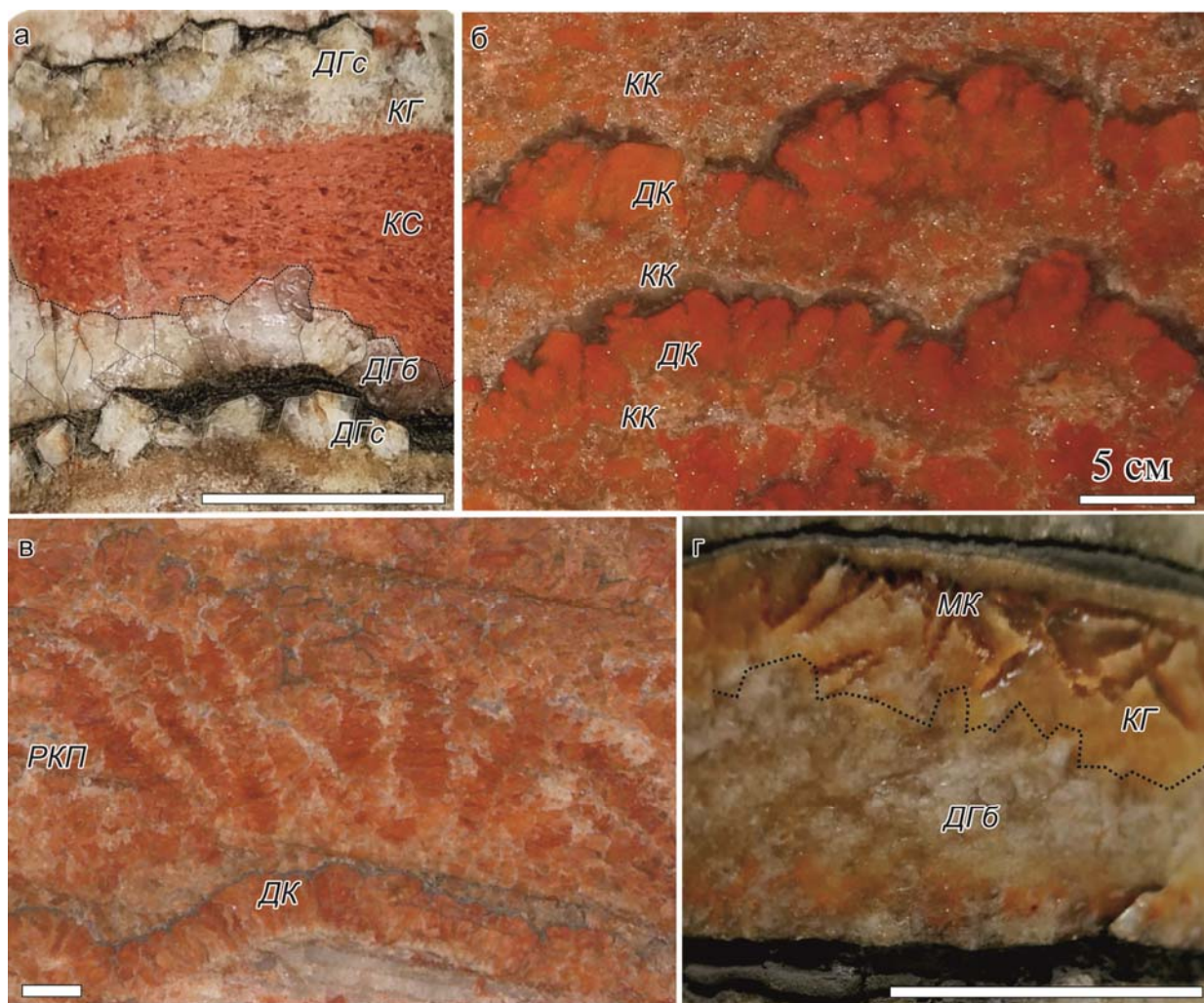


Рис. 6. Типичные агрегаты сильвина (а) и карналлита (б-г) Верхнекамского месторождения. Буквами обозначены: КС – кумулятивный сильвин, ДГс – донный галит серый, ДГб – донный галит белый, КГ – кумулятивный галит, ДК – донный карналлит, КК – кумулятивный карналлит, РКП – корочки карналлита, сформированные на поверхности рапы, затонувшие и регенерированные на дне и в осадке; МК – метакристаллы карналлита. Масштабная линейка равна 5 см

Наиболее поздний галит выполняет интерстиции между кимберлитовыми автолитами, а также усадочные трещины сколовой природы, что отражает его кристаллизацию из водных растворов. В каменной соли на удалении от кимберлитовой трубки выявлено присутствие диагенетических метакристаллов кварца, целестина и кургантаита ($\text{CaSr}[\text{B}_5\text{O}_9]\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$). При термальном и флюидном воздействии кимберлитов на каменную соль за счет последнего формируются новые бораты: железистый ссайбелиит $(\text{Fe},\text{Mg})\text{VO}_2(\text{OH})$, екатеринит $\text{Ca}_2(\text{B}_4\text{O}_7)(\text{Cl},\text{OH})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и попугаеваит $\text{Ca}_3[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6]\text{FCl}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$, что отражает обогащенность посткимберлитовых растворов

Са, Mg и F (Зубкова и др., 2020; Rekov et al., 2025).

Образование Ангара-Илимских месторождений железных руд, связанных с трапповыми трубками взрыва, обусловлено взаимодействием базальтовой магмы с толщами кембрийских эвапоритовых доломитов, их термальной диссоциацией с выделением углекислого газа, превращением расплава в газовой-пепловый флюид и формированием диатрем, выполненных туфовым материалом (Фон-дер-Флаас, 1993). На месторождениях встречены и открыты новые минералы бора (екатеринит, стронциохильгардит, шабынит), связанные с его поступлением из галогенных толщ (Малинко и др., 1980, 1981; Перцев и др., 1980).

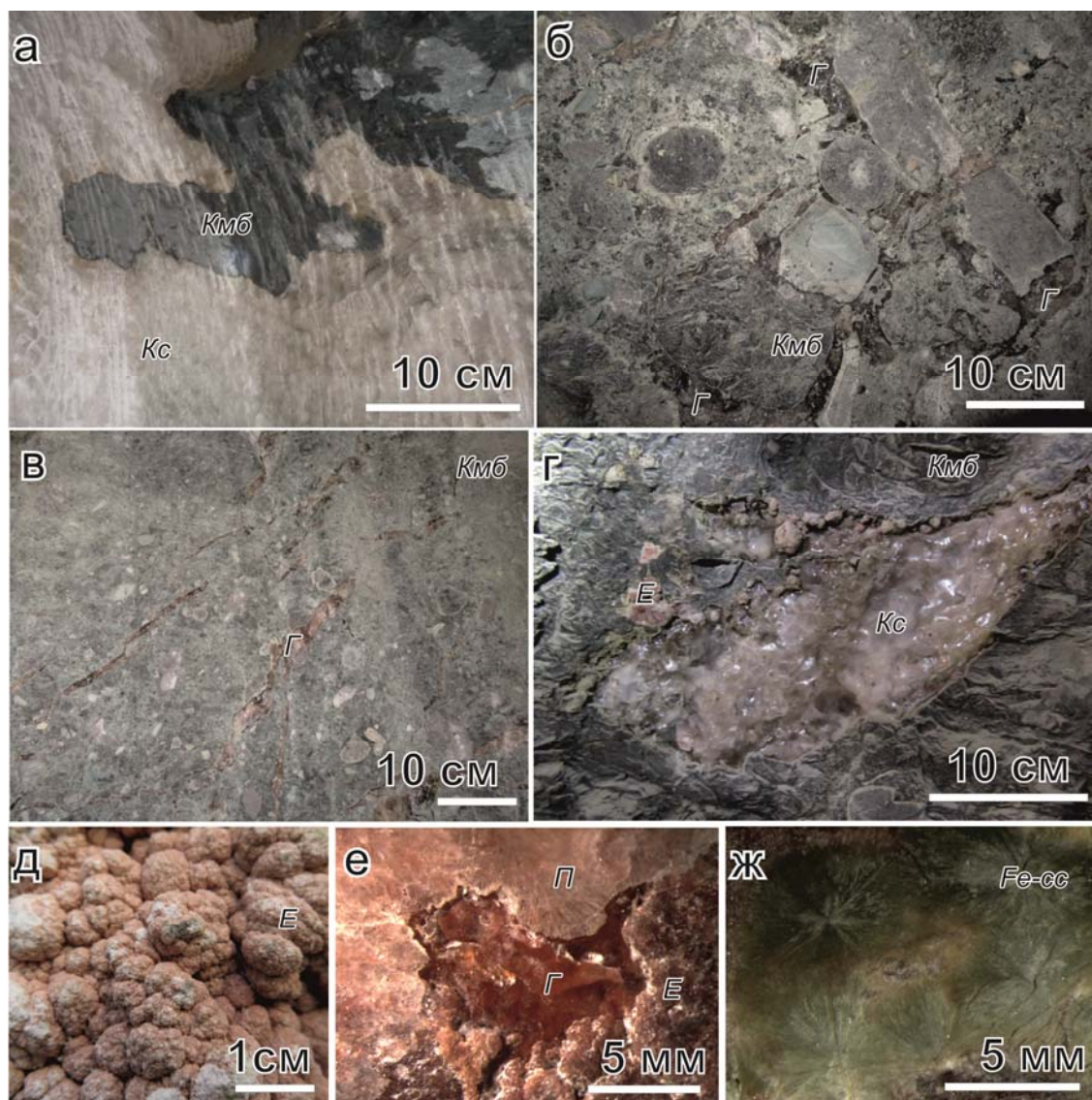


Рис. 7. Взаимоотношения кимберлита, каменной соли и галита (в трубке Интернациональная: а – обособления кимберлита (Кмб) в каменной соли (Кс); б – автолиты кимберлита, сцементированные галитом (г); в – трещины усадки в кимберлите, залеченные галитом; г – ксенолит каменной соли с новообразованным екатеринитом (Е); д – сферолитовые корки екатеринита; е – прожилок с попугеваитом (П), галитом и екатеринитом; ж – сферолиты железистого ссайбелиита (Fe-сс)

Эвапориты в гипергенном процессе

Принято считать, что эвапориты не выветриваются, а сразу растворяются, что провоцирует проявление карста. Однако это не всегда так. Практически все месторождения гипса являются продуктами выветривания (гидратации) ангидритовых толщ (Страхов, 1963).

В кровле соляных залежей и куполов образуются кепроки (остаточные гипсово-глинистые шляпы), в которых формируются так называемые «элювиальные» месторождения боратов (Еремин, 2007). Отмечаемая в них сверху вниз зональность по разрезу

(кальциевые → калиевые → магниевые) говорит о явном проявлении катионной дифференциации, отражающей значительное химическое преобразование боратов в коре выветривания, изначально рассеянных в нижележащих солях.

Через промежуточное и нередко довольно устойчивое состояние (доломитовая и гипсовая мука) происходит выветривание карбонатных и сульфатных эвапоритов. На примере Казаковской горы (Пермский край) (рис. 8) зафиксировано поэтапное выветривание пелитоморфных доломитов: образование решетки доломитовых прожилков перекристаллизации → выщелачивание пелито-

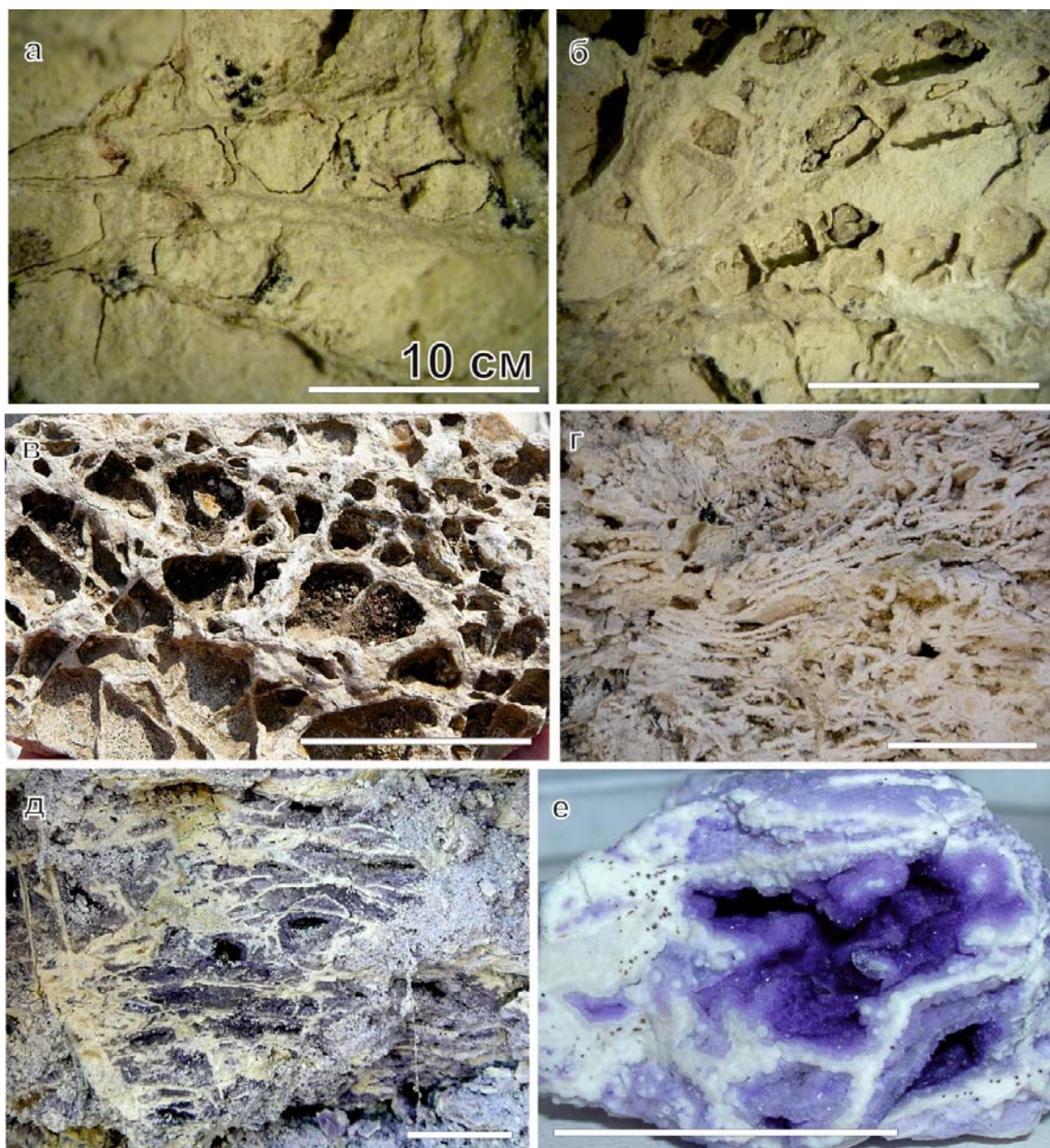


Рис. 8. Последовательность гипергенного изменения пелитоморфных доломитов туюйской и неволинской пачек иренской свиты кунгурского яруса (Казаковская гора, Пермский край): а – образование доломитовых прожилков перекристаллизации; б, в – начальное и полное выщелачивание пелитоморфного доломита; г – брекчия уплотнения; д, е – инкрустация гипергенным флюоритом. Масштабная линейка равна 10 см

морфного доломита с образованием ячейистой породы → уплотнение и цементация прожилкового каркаса с образованием плитчатых брекчий, иногда даже с гипергенной флюоритовой минерализацией (Чайковский и др., 2010).

Заключение

Мощности годовых слоев арагонита удачининской свиты (1–7 см), солей Верхнекамского месторождения (1–30 см), мираби-

лита в озере Селитренное (более метра) являются ярким примером лавинной седиментации, на несколько порядков превышающей таковую в терригенных осадках, и свидетельствуют о неординарности эвапоритового породообразования. Оно проявляется в многообразии механизмов образования зародышей эвапоритовых минералов: в виде «лодочек» и корок на поверхности водоема, в толще рапы, на дне (в том числе в условиях активной волновой деятельности), а также внутри осадка. Различие текстурных типов

солей на месторождениях может говорить о преобладании на них разных механизмов отложения.

Эвапориты активно трансформируются при взаимодействии с магматическими комплексами и вовлекаются в процесс эндогенного минералообразования, что видно на примере магнезиальных скарнов Слюдянки, кимберлитовых трубок Якутии, Ангаро-Илимских железорудных месторождений, медно-никелевых руд Норильского района.

Изменение эвапоритовых толщ при миграции через них маломинерализованных вод или рассолов за счет выщелачивания, метасоматоза или гидратации приводит к формированию промышленных залежей апокарналлитовых сильвинитов, аподоломитовых магнезитов, апоангидритового гипса.

Разрушение эвапоритов провоцирует не только расцементацию остаточного материала (доломитовая и гипсовая мука), но и химическую перегруппировку вещества с образованием доломитовых брекчий, залежей флюорита и боратов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания «Процессы рудообразования и гипергенной трансформации эвапоритов Пермского Предуралья», рег. №НИОКТР 124020500052-9

Библиографический список

- Валяшко М. Г. Галит, его основные разности, встречаемые в соляных озерах и их структурные особенности // Труды ВНИИГ. М.; Л.: Изд-во им. Котлякова, 1952. Вып. XXIII. С. 26–53.
- Валяшко М. Г. Геохимические особенности формирования месторождений калийных солей. М.: Изд-во МГУ, 1962. 402 с.
- Вахрамеева В. А. К стратиграфии и тектонике Верхнекамского месторождения // Труды ВНИИГ. Л.: Госхимиздат, 1956. Вып. 32. С. 277–313.
- Виноградов А. П., Боровик-Романова Т. Ф. К геохимии стронция // ДАН СССР. 1945. Т. 46, № 5. С. 211–214.
- Гаркема В. М. Очерк месторождений соли и добыча ее в Астраханской губернии // Горный журнал. 1894. Т. 1. С. 426–460.
- Годлевский М. Н., Гриненко Л. Н. Некоторые данные об изотопном составе серы сульфидов Норильского месторождения // Геохимия. 1963. № 1. С. 35–39.
- Григорьев Д. П. Онтогенез минералов. Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1961. 284 с.
- Еремин Н. И. Неметаллические полезные ископаемые: уч. пос. М.: Изд-во МГУ, ИКЦ «Академкнига», 2007. 459 с. ISBN: 978-5-211-05370-0 EDN: QKGHEL
- Зубкова Н. В., Пеков И. В., Чуканов Н. В., Чайковский И. И., Япаскерт В. О., Пуцаровский Д. Ю. Новая высокожелезистая разновидность ссайбелиита и ее кристаллохимические особенности // Записки РМО. 2020. Т. 149, № 2. С. 72–79. DOI: 10.31857/S0869605520020112 EDN: RUVXQK
- Кашкаров О. Д. Садка солей в соляных озерах // Труды ВНИИГ. Л.: Госхимиздат, 1956. Вып. 32. С. 3–33.
- Коржинский Д. С. Основы метасоматизма и метамагматизма. Избранные труды. М.: Наука, 1993. 239 с.
- Крупенин М. Т. Магнезиально-железистые карбонатные руды в рифейских отложениях Башкирского мегантиклинория: автореф. ... д-ра геол.-минер. наук. Новосибирск, 2025. 46 с.
- Лидер М. Седиментология. Процессы и продукты. М.: Мир, 1986. 439 с.
- Малинко С. В., Лисицын А. Е., Наумова И. С., Пурусова С. П. Стронциоильгардит из Коршуновского железорудного месторождения // ЗВМО. 1981. Ч. 110, Вып. 5. С. 588–593.
- Малинко С. В., Фицев Б. П., Кузнецова Н. Н., Черкасова Л. Е. Екатеринит – новый минерал бора // Записки ВМО. 1980. № 4. С. 469–476.
- Перцев Н. Н., Малинко С. В., Вахрушев В. А., Фицев Б. П., Соколова Е. В., Никитина И. Б. Шабьинит – новый водный борат-хлорид магния // Записки ВМО. 1980. Ч. 109, Вып. 5. С. 569–573.
- Страхов Н. М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 535 с.
- Уразов Г. Г. О порядке отложения солей Соликамского месторождения // Труды ГГРУ НКТП СССР. 1932. Вып. 43. С. 28–58.
- Уткина Т. А., Чайковский И. И. Фациальные и гидроклиматические реконструкции условий формирования солей Верхнекамского месторождения // Литология и полезные ископаемые. 2026. № 1. С. 82–96. DOI: 10.1134/S0024490225700336 EDN: UGEXBV
- Уткина Т. А., Чайковский И. И., Кадебская О. И. Карбонатные и сульфатные эвапориты Пермского Прикамья. Екатеринбург: Изд-во «УрО РАН», 2025. 234 с.
- Фон-дер-Флаас Г. С. Структура и вопросы генезиса железорудных месторождений Ангарской провинции: автореф. ... д-ра. геол.-минер. наук. Новосибирск, 1993. 82 с.

Чайковский И. И., Долгих М. В. Криогенная минерализация в рассолах Верхнекамского месторождения // Горное Эхо. Пермь: ГИ УрО РАН, 2007. № 1. С. 38–41. EDN: WAJPAH

Чайковский И. И., Кадебская О. И., Чиркова Е. П. О гипергенной природе флюоритового оруденения Казаковской горы // Природные ресурсы: Вестник недропользователя Пермского края. Пермь, 2010. № 2 (29). С. 83–91.

Чайковский И. И., Прямилов Н. А., Николаев А. С. Новообразованные галоиды Верхнекамского месторождения (на примере первого Березниковского рудоуправления) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2006. Вып. 9. С. 131–143.

Шванов В. Н. Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). Л.: Недра, 1987. 269 с.

Lowenstein T. K., Hardie L. A. Criteria for the recognition of salt-pan evaporites // Sedimentology. 1985. Vol. 32. P. 627–644.

Pekov I. V., Zubkova N. V., Chaikovskiy I. I., Chukanov N. V., Belakovskiy D. I., Yapaskurt V. O. et al. Popugaevaite, $\text{Ca}_3[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6]\text{FCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, a new phylloborate mineral // Mineralogical Magazine. 2025. No. 89 (2). P. 225–233.

Tekin E., Ayyildiz T., Gündoğan I., Orti F. Modern halolites (halite oolites) in the Tuz Gölü, Turkey // Sedimentary Geology. 2007. Vol. 195. P. 101–112.

Verrecchia E. P., Verrecchia K. E. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification // Jour. of Sedim. Res. 1994. Vol. 64A, No. 3. P. 650–664.

Warren J. K. Evaporites. A Geological Compendium. Second Edition. Springer, 2016. 1813 p.

Warren J. K. The hydrological setting, occurrence and significance of gypsum in late Quaternary salt lakes in South Australia // Sedimentology. 1982. No. 29. P. 609–638.

Evaporite Ontogenesis

I. I. Chaikovskiy, T. A. Utkina, M. V. Bubnova

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 78A Sibirskaya Str., Perm 614007, Russia

The main mechanisms of carbonate, sulfate, and chloride evaporite sedimentation (in the form of boats and crusts on the surface of a reservoir, in the brine, on the bottom (including the conditions of strong wave activity), and within sediment are characterized. The involvement of evaporites in the process of endogenous mineral and rock formation, as well as their transformation during the migration of brines or less mineralized waters through them, are demonstrated. It is noted that the destruction of evaporites leads not only to the accumulation of residual material but also to significant chemical rearrangement of the substance with the formation of differentiated weathering crusts.

Key words: *Evaporites; sedimentation mechanisms; diagenesis; supergenesis.*

References

Valyashko M. G. 1952. Galit, yego osnovnyye raznosti, vstrechayemye v solyanykh ozerakh i ikh strukturnye osobennosti [Halite, its main varieties encountered in salt lakes and their structural features]. Trudy VNIIG. Moskva, Leningrad, Izd-vo im. Kotlyakova. 23:26–53 (in Russian).

Valyashko M. G. 1962. Geokhimicheskiye osobennosti formirovaniya mestorozhdeniy kaliynykh soley [Geochemical features of the formation of potassium salt deposits]. Moskva, Izd-vo MGU, p. 402 (in Russian)

Vakhrameyeva V. A. 1956. K stratigrafii i tektonike Verkhnekamskogo mestorozhdeniya [On the stratigraphy and tectonics of the Verkhnekamskoye deposit]. Trudy VNIIG. Leningrad. Goskhimizdat. 32:277–313. (in Russian)

Vinogradov A. P., Borovik-Romanova T. F. 1945. K geokhimii strontsiya [On the geochemistry of strontium]. DAN SSSR. 46 (5):211–214. (in Russian)

Garkema V. M. 1894. Ocherk mestorozhdeniy soli i dobycha yeyo v Astrakhanskoy gubernii [Essay on salt deposits and its extraction in the Astrakhan province]. Gornyy zhurnal. 1:426–460. (in Russian)

Godlevskiy M. N., Grinenko L. N. 1963. Nekotorye dannye ob izotopnom sostave sery sulfidov Noril'skogo mestorozhdeniya [Some data on the isotopic composition of sulfur in sulfides of the Norilsk deposit]. Geokhimiya. 1:35–39. (in Russian)

Grigoryev D. P. 1961. Ontogeniya mineralov [Ontogeny of minerals]. Lvov University Press, p. 284. (in Russian)

Yeremin N. I. 2007. Nemetallicheskiye poleznye is-kopayemye [Non-metallic minerals: study area]. Moscow. Akademkniga. p. 459. (in Russian)

Zubkova N. V., Pekov I. V., Chukanov N. V., Chaikovskiy I. I., Yapaskurt V. O., Pushcharovskiy D. Yu. 2020. Novaya vysokozhelezistaya raznovidnost saybelita i yeye kristallokhimicheskiye osobennosti [New high-iron variety of szaibelyite and its crystallochemical features]. Notes of the RMO. 149(2):72–79. (in Russian)

- Kashkarov O.D.* 1956. Sadka soley v solyanykh oze-rakh [Salt sedimentation in salt lakes]. Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorology. 32:3–33. (in Russian)
- Korzhinskiy D.S.* 1993. Osnovy metasomatizma i metamagmatizma [Fundamentals of Metasomatism and Metamagmatism. Selected Works]. Moscow, Nauka, p. 239. (in Russian)
- Krupenin M.T.* 2025. Magnezialnozhelezistyye karbonatnyye rudy v rifeyskikh otlozheniyakh Bashkirskogo megantiklinoriya (istochniki veshchestva, etapy i mekhanizmy formirovaniya) [Magnesian-ferruginous carbonate ores in the Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium (sources of matter, stages and mechanisms of formation)]. Diss., p. 46. (in Russian)
- Lider M.* 1986. Sedimentologiya. Protsessy i produkty [Sedimentology. Processes and products]. Moscow, Mir, p. 439. (in Russian)
- Malinko S.V., Lisitsyn A.Ye., Naumova I.S., Purusova S.P.* 1981. Strontsiokhlgardit iz Korshunovskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya [Strontiumhlgardite from the Korshunovskiy iron ore deposit]. ZVMO. 110(5):588–593. (in Russian)
- Malinko S.V., Fitsev B.P., Kuznetsova N.N., Cherkasova L.Ye.* 1980. Yekaterinit – novyy mineral bora [Ekaterinite is a new boron mineral]. WMO Notes. 4:469–476. (in Russian)
- Pertsev N. N., Malinko S. V., Vakhrushev V. A., Fitsev B. P., Sokolova Ye. V., Nikitina I. B.* 1980. Shabynit – novyy vodnyy borat-khlord magniya [Shabynite—a new aqueous magnesium borate chloride]. Zapiski VMO. 109(5):569–573. (in Russian)
- Strakhov N. M.* 1963. Tipy litogeneza i ikh evolyutsiya v istorii Zemli [Types of lithogenesis and their evolution in the history of the Earth]. Moscow, Gosgeoltekhizdat, p. 535 (in Russian)
- Urazov G.G.* 1932. O poryadke otlozheniya soley So-likamskogo kaliyevogo mestorozhdeniya [On the order of salt deposition at the Solikamsk potassium deposit]. Proceedings of the Main Mining and Processing Department of the People's Commissariat of the USSR. 43:28–58. (in Russian)
- Utkina T.A., Chaykovskiy I.I.* 2026. Fatsialnye i gidroklimaticheskiye rekonstruktsii usloviy formirovaniya soley Verkhnekamskogo mestorozhdeniya [Facies and hydroclimatic reconstructions of the conditions of salt formation at the Verkhnekamskoye deposit]. Lithology and minerals. 1:82–96. doi:10.1134/S0024490225700336 (in Russian)
- Utkina T.A., Chaykovskiy I.I., Kadebskaya O.I.* 2025. Karbonatnye i sulfatnye evapority Permskogo Prikamya [Carbonate and sulfate evaporites of the Perm Kama region]. Ekaterinburg, UB RAS Publishing house, p. 234. (in Russian)
- Fon-der-Flaas G. S.* 1993. Struktura i voprosy genezisa zhelezorudnykh mestorozhdeniy Angarskoy provintsii [Structure and genesis issues of iron ore deposits of the Angara province]. Diss. Novosibirsk, p. 82. (in Russian)
- Chaykovskiy I.I., Dolgikh M.V.* 2007. Kriogennaya mineralizatsiya v rassolakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniya [Cryogenic mineralization in brines of the Verkhnekamskoye field]. Mining Echo. 1:38–41. (in Russian)
- Chaykovskiy I.I., Kadebskaya O.I., Chirkova E.P.* 2010. O gipergennoy prirode flyuritovogo orudneniya Kazakovskoy gory [On the hypergene nature of fluorite mineralization of Kazakovskaya Mountain]. Natural resources. 2(29):83–91. (in Russian)
- Chaykovskiy I.I., Pryamilov N.A., Nikolayev A.S.* 2006. Novoobrazovannyye galoidy Verkhnekamskogo mestorozhdeniya (na primere pervogo Bereznikovskogo rudoupravleniya) [Newly formed halides of the Verkhnekamskoye deposit (on the example of the first Bereznikovskoye mine)]. Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. 9:131–143. (in Russian)
- Shvanov V.N.* 1987. Petrografiya peschanykh porod (komponentnyy sostav, sistematika i opisaniye mineralnykh vidov) [Petrography of sandy rocks (component composition, systematics and description of mineral species). Leningrad, Nedra, p. 269 p. (in Russian)
- Lowenstein T.K., Hardie L.A.* 1985. Criteria for the recognition of salt-pan evaporates. Sedimentology. 32:627–644.
- Pekov I.V., Zubkova N.V., Chaikovskiy I.I., Chukanov N.V., Belakovskiy D.I., Yapaskurt V.O. et al.* 2025. Popugaevaite, $\text{Ca}_3[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6]\text{FCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, a new phylloborate mineral. Mineralogical Magazine. 89(2): 225–233.
- Tekin E., Ayyildiz T., Gundogan I., Orti F.* 2007. Modern halolites (halite oolites) in the Tuz Gölü, Turkey. Sedimentary Geology. 195:101–112.
- Verrecchia E.P., Verrecchia K.E.* 1994. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification. Jour. of Sedim. Res. 64(3):650–664.
- Warren J. K.* 2016. Evaporites. A Geological Compendium. Second Edition. Springer, p.1813.
- Warren J. K.* 1982. The hydrological setting, occurrence and significance of gypsum in late Quaternary salt lakes in South Australia. Sedimentology. 29:609–638.