

*На правах рукописи*



**Калинина Татьяна Александровна**

**КАРБОНАТНЫЕ И СУЛЬФАТНЫЕ ЭВАПОРИТЫ  
ПЕРМСКОГО ПРИКАМЬЯ:  
УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫВЕТРИВАНИЯ**

Специальность 25.00.06 – Литология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Казань – 2015

Работа выполнена в лаборатории геологии месторождений полезных ископаемых Федерального государственного бюджетного учреждения науки Горного института Уральского отделения Российской академии наук

**Научный руководитель**

**Чайковский Илья Иванович,**  
доктор геолого-минералогических наук,  
ГИ УрО РАН, г. Пермь

**Официальные оппоненты**

**Мизенс Гунар Андреевич,**  
доктор геолого-минералогических наук, старший  
научный сотрудник ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург

**Гончаренко Ольга Павловна,**  
доктор геолого-минералогических наук, заведующая  
кафедрой петрологии и прикладной геологии,  
Саратовский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов

**Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки **Институт геологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,**  
г. Сыктывкар

Защита состоится **11 декабря 2015 г.** на заседании диссертационного совета Д 212.081.09 при Казанском федеральном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5, ИГиНГТ КФУ, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета. Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальных сайтах ВАК Министерства образования и науки РФ <http://www.vak.ed.gov.ru> и ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» [www.kpfu.ru](http://www.kpfu.ru).

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, Казанский (Приволжский) федеральный университет, отдел аттестации научно-педагогических кадров. Факс: (843) 2337867.

Автореферат разослан 5 октября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



А.А. Галеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Пермский период представляет интерес как один из наиболее благоприятных для эвапоритового осадконакопления за всю историю палеозоя [Жарков, 1978]. Уникальные масштабы испарительных процессов и проявившейся химической дифференциации привели к образованию мощных соленосных и сульфатоносных толщ, характеризующихся огромной площадью распространения. Одним из наиболее крупных пермских эвапоритовых бассейнов является Восточно-Европейский – галогенные породы здесь развиты на площади свыше 1,5 млн. км<sup>2</sup>.

Широкое распространение нижнепермских карбонатных и сульфатных эвапоритов в Пермском Прикамье предопределило минерагеническую специализацию, сводившуюся к традиционно разрабатываемым месторождениям строительного и поделочного гипса. Однако открытие в 1996 г. крупнейшего в России Мазуевского месторождения стронция [Болотов, 1997; Конопаткин, 1999], огромные масштабы проявившегося в Прикамье травертинообразования, которое в настоящее время связывается с разрушением эвапоритов [Кокаровцев, 1992], и многочисленные проявления флюорита [Абрамович, Нечаев, 1960] и боратов свидетельствуют о большем минерагеническом потенциале этих толщ [Ибламинов, Лебедев, 2004]. Актуальность изучения эвапоритов обусловлена также легкой растворимостью толщ и чуткостью к тектоническим деформациям, что может быть использовано не только для реконструкции палеотектонических движений, но и прогноза качества сырья и пространственного расположения проявлений полезных ископаемых.

Анализ изученности карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья показал, что несмотря на длительную историю их изучения (более 170 лет) [Софроницкий, 1973], до сих пор остается ряд нерешенных вопросов, связанных с условиями их формирования и последующего гипергенного преобразования. Такое положение обусловило отсутствие сведений о закономерностях строения карбонатных, сульфатных и смешанных карбонатно-сульфатных массивов и поведения химических элементов при начальном и зрелом гипергенезе эвапоритовых толщ, которые могли бы повысить эффективность геологоразведочных работ.

**Цель работы** заключается в выявлении условий формирования и постседиментационных изменений карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- установление структурно-текстурных типов сульфатных и карбонатных эвапоритов, последовательности их напластования, реконструкция условий их седименто- и диагенеза;
- исследование минералогических, литохимических и геохимических особенностей первично-осадочных и преобразованных сульфатных и карбонатных эвапоритов;
- исследование продуктов вторичных изменений, реконструкция стадийности гипергенного преобразования эвапоритов.

**Фактический материал** собран в 2010-2015 гг. при выполнении бюджетных программ лаборатории ГМПИ Горного института УрО РАН в рамках проектов «Исследование структурно-генетических особенностей соленосных и сульфатоносных формаций» (ГР № 01200955519; 2009-2011 гг.), «Проблемы формирования и структурно-вещественной эволюции эвапоритовых толщ Предуралья Краевого прогиба» (ГР № 01201350097; 2012-2014 гг.), «Минеральные, флюидные и органические включения в природных солях: генезис, индикаторное и поисковое значение, технологические проблемы, практическое использование» (№ 12-И-5-2026, ГР № 01201275115; 2012-2014 гг.), «Геохимия органического и неорганического вещества в эвапоритовых толщах Пермского Прикамья» (№ 14-5-НП-259; 2014 г.). В рамках данных проектов проводились полевые работы на шести разре-

зах нижнепермских эвапоритов Пермского Прикамья, а также изучение kernового материала из надсолевой толщи Верхнекамского месторождения и карбонатно-сульфатного массива Ледяной горы (суммарная мощность изученного керна около 3000 м). Было изучено более 350 образцов, представляющих различные структурно-текстурные различия карбонатных и сульфатных эвапоритов. При выполнении работы проведено оптико-микроскопическое исследование 35 шлифов (поляризационный микроскоп Axioskop 40 Pol (Carl Zeiss), ГИ УрО РАН, г. Пермь). Определение макрокомпонентного состава (25 анализов) выполнялось на рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном анализаторе X-Supreme 8000 фирмы Oxford Instruments в ГИ УрО РАН (г. Пермь), а содержание микроэлементов (37 анализов) – методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) на приборе ELAN 9000 фирмы PerkinElmer (аналитик Д.В. Киселева) в Институте геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН (г. Екатеринбург). Измерение изотопов углерода и кислорода (30 проб) проводились в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН на аналитическом комплексе ThermoFisher Scientific (аналитик И.В. Смолева). Минералого-петрографическое изучение и микрозондовый анализ (более 5500 определений, в том числе около 1000 локальных) проводились под сканирующим электронным микроскопом VEGA 3 TESCAN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350/X-max 20 (аналитики Е.П. Чиркова, О.В. Коротченкова). Для определения минерального состава борной минерализации и глинистой фракции применялся рентгенофазовый анализ (17 анализов) на рентгеновском порошковом дифрактометре D2 Phaser фирмы «Bruker» (г. Пермь, ПГНИУ, аналитик Г.А. Исаева)

**Личный вклад автора** заключается в его участии в период с 2010 по 2015 г. в полевых и тематических научно-исследовательских работах в качестве исполнителя и руководителя тем по изучению карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья, а также получении научных и практических результатов, изложенных в диссертационной работе. Все материалы исследований, положенные в основу диссертации, обработаны автором лично. Все выводы получены им самостоятельно. Материалы, представленные в данной работе без библиографических ссылок, принадлежат автору.

#### **Научная новизна**

1. Впервые проведено комплексное литолого-минералогическое и геохимическое изучение карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья.

2. Установлено, что формирование различных структурно-текстурных типов карбонатных и сульфатных эвапоритов и их закономерная смена по разрезу обусловлены циклическостью осадконакопления и формированием на регрессивном и трансгрессивном этапах.

3. Впервые получена современная геохимическая и изотопно-геохимическая ( $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ) характеристика карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья, позволявшая реконструировать обстановки осадконакопления в раннепермском эвапоритовом бассейне и процессы их гипергенного преобразования.

4. Выявлена специфика гидратации ангидритсодержащих эвапоритов Пермского Прикамья и ее влияние на смежные карбонатные породы.

5. Впервые проведено минералого-петрографическое и геохимическое изучение продуктов выветривания карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья, позволявшее реконструировать обстановки их гипергенеза.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Карбонатные и сульфатные эвапориты Пермского Прикамья формировались на регрессивной и трансгрессивной стадиях развития раннепермского бассейна, определивших их литологические, минералогические, геохимические и изотопные особенности.

2. Специфика гидратации ангидрита и последующей перекристаллизации гипса определяется содержанием и распределением сульфатного материала в породе и сопровождается проявлением разнообразных деформаций, структурно-текстурной перестройкой, пространственным перераспределением элементов, декальцификацией и перекристаллизацией сопряженных с ними карбонатов.

3. Специфика зрелого гипергенеза карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья определяется составом субстрата, а основными процессами являются физическая дезинтеграция, растворение и выщелачивание. Разрушение эвапоритов приводит к пространственной перегруппировке вещества, сопровождаемой образованием оксидов, гидроксидов, фосфатов, ванадатов, молибдатов, сульфатов, сульфидов, самородных фаз и промышленных скоплений флюорита.

**Практическая значимость.** Выявленные структурно-текстурные особенности карбонатных и сульфатных эвапоритов могут быть использованы для расчленения разрезов пермских эвапоритов, оценки качества сульфатного сырья, оценки сохранности гипсовых массивов, поисков сопутствующих полезных ископаемых (целестина, флюорита, борного сырья) и прогнозирования сценариев развития карста и гипсовой тектоники.

**Апробация работы.** Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях Горного института УрО РАН (Пермь, 2012-2015), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» с элементами молодежной научной школы (Пермь, 2011); Международной конференции, посвященной 170-летию со дня открытия пермской системы «Пермская система: стратиграфия, палеонтология, палеогеография, геодинамика и минеральные ресурсы» (Пермь, 2011); International congress on «Scientific research in show caves» (Skocjan-Borgo Grotta Gigante (Italy), Brisciki-Postojna (Slovenia), 2012); International Workshop on ice caves IWIC-V (Barzio, Valsassina, Grigna and Milano (Italy), 2012); Минералогическом семинаре «Кристаллическое и твердое некристаллическое состояние минерального вещества: проблемы структурирования, упорядочения и эволюции структуры» (Сыктывкар, 2012); Научных чтениях памяти П.Н. Чирвинского «Проблемы минералогии, петрографии и металлогении» (Пермь, 2012-2015); Всероссийской молодежной научной конференции «Уральская минералогическая школа» (Екатеринбург, 2013, 2014); VII Всероссийском литологическом совещании (Новосибирск, 2013); Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию юбилею научной и туристско-экскурсионной деятельности в Кунгурской Ледяной пещере и 100-летию со дня рождения В.С. Лукина (Кунгур, 2014); Всероссийской школы студентов, аспирантов и молодых ученых по литологии «Виртуальные и реальные литологические модели» (Екатеринбург, 2014).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы изложены в 22 научных работах, из них 3 работы – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ для защиты диссертаций.

**Структура работы.** Работа состоит из введения, трех разделов и заключения. Объем работы составляет 185 страниц, включает 117 рисунков и 22 таблицы. Список литературы состоит из 218 источников, из них 73 – иностранных.

**Благодарности.** Работа выполнена под руководством д.г.-м.н. И.И. Чайковского, который направил автора по пути настоящего исследования и которому автор выражает глубокую признательность за то, что никогда не оставался на этом пути один. В наименьшей степени автор благодарен О.И. Кадебской за проведенные вместе полевые работы и всестороннюю помощь, а также Е.П. Чирковой, О.В. Коротченковой и Е.В. Чайковской за помощь в проведении анализов и интерпретации полученных данных. Автор также благода-

рит Н.В. Лаврову, В.П. Ожгибесова, Г.Ю. Пономареву, В.В. Силантьева, Г.В. Сонина, А.К. Алваняна, коллектив лаборатории геологии месторождений полезных ископаемых Горного института УрО РАН и всех тех, кто так или иначе способствовал подготовке данной работы. Автор крайне признателен руководству ООО «КНАУФ ГИПС КУНГУР» за бескорыстное проведение буровых работ на Ледяной горе и предоставленный для исследований керновый материал.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описаны актуальность работы, объект изучения, цель и задачи, научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов диссертации, а также приведены сведения об апробации работы и публикациях. Здесь же сформулированы защищаемые положения и кратко охарактеризована структура работы.

### **1. Литология и процессы формирования карбонатных и сульфатных эвапоритов**

История изучения карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья связана с именами А.А. Штукенберга, Г.Н. Фредерикса, П.Н. Герасимова, Е.И. Тихвинской, В.П. Золотовой, Б.И. Грайфера, А.А. Оборина, Б.И. Чувашова, В.И. Копнина, П.А. Софро-ницкого, М.П. Фивега, В.З. Хурсика и др.

Карбонатные и сульфатные эвапориты Пермского Прикамья приурочены к восточной окраине Восточно-Европейской платформы и Предуральскому краевому прогибу. В стратиграфическом отношении они охватывают верхнюю часть филипповской свиты филипповского горизонта и иренскую свиту иренского горизонта кунгурского яруса, а также нижнюю часть соликамской свиты соликамского горизонта уфимского яруса. В строении иренской свиты выделяются [Международный..., 1991] три карбонатные (неволинская, ел-кинская, тюйская) и четыре сульфатные (ледянопещерская, шалашнинская, демидковская, лунежская) пачки. Переслаивание карбонатных и сульфатных пачек позволяет выделить пять циклитов, каждый из которых начинается с доломитов, сменяющихся гипсами или ангидритами. Такая последовательность отвечает циклу развития эвапоритового бассейна. Соликамские отложения сформировались в начальный период трансгрессивного цикла раннепермского моря, когда шло распреснение реликтовой кунгурской палеолагуны.

***Литологическая характеристика.*** Изучение структурно-вещественных особенностей филипповско-иренских эвапоритов показало, что карбонатные пачки сложены известковистыми доломитами с выдержанным тонкослоистым пелитоморфным, реже массивным оолитовым строением. Чередование этих разностей в разрезе позволяет предполагать смену условий седиментации в раннепермском бассейне: от хорошо прогретых мелководных с активной гидродинамикой до более глубоководных гидродинамически пассивных. Появление участков оолитового строения с поровым гипсовым цементом, а также присутствие желваков сульфатов в секущих трещинах позволяет предполагать, что часть сульфата в карбонатных пачках имеет не седиментационную природу, а связана с привносом сульфат-иона на стадии диагенеза.

Соликамские карбонаты представлены мергелями. Появление терригенного материала в составе пород, а также присутствие мелких углистых растительных остатков говорят об усилении континентального стока в бассейн седиментации, связанного, вероятно, с тектонической активизацией Урала. Тонкослоистая текстура мергеля в нижней части соликамской свиты Соликамской впадины, а также наличие слоев каменной соли и линзообразных прослоев галит-ангидритового и доломит-ангидрит-галитового состава свидетельствуют о том, что карбонатонакопление в раннесоликамское время происходило в мелководном изолированном бассейне с повышенной соленостью вод и пассивным или слабоактивным гидродинамическим режимом. Полное отсутствие скелетной фауны в нижней ча-

сти соликамской свиты может свидетельствовать об экстремальных условиях осадконакопления, неблагоприятных для жизни. Появление раковин морских и пресноводных двусторок, свидетельствующих о появлении связи с северным морем, отмечено только в верхней части соляно-мергельной толщи.

Крупные строматолитовые постройки, наличие прослоев желваков сульфатов, отпечатков и псевдоморфоз по скелетным кристаллам галита, а также появление трещин усыхания позволяет предполагать, что на платформенной части соликамский бассейн характеризовался более мелководными условиями и, вероятно, был подвержен периодическому осушению. Подобные условия карбонатообразования сопоставимы с современными себхами побережья Персидского залива [Шрейбер и др., 1990; Hudson, 1977].

Для сульфатных пачек отмечается циклическое строение: от шевронных структур в подошвенной части пачки к мелкозернистой неяснослоистой (центр), а затем желваковой и/или линзовидно-желваковой (кровля) породе. Такое строение прослоев позволяет предполагать, что садка сульфатного вещества началась с образования крупных кристаллов гипса и их двойниковых агрегатов из слабонасыщенных растворов [Warren, 1982]. Их смена вверх по разрезу мелкозернистым материалом свидетельствует о последующем переиспещении рассолов в бассейне осадконакопления и массовом отложении пелитоморфного гипсового [Macdonald, 1953] или бассанитового [Kinsman, 1965; Van Driessche et al., 2012] материала. Изменение массивной текстуры сульфатов на линзовидно-желваковую и желваковую обусловлено увеличением содержания в породе глинисто-карбонатной составляющей [Копнин, 1996]. Последнее может свидетельствовать об опреснении палеобассейна и привносе терригенных осадков. Таким образом, наблюдаемая смена шевронного гипса неяснослоистым, желваковым и линзовидно-желваковым представляет собой результат закономерного изменения концентрации вод бассейна на сульфатной стадии цикла.

В литературе вопрос образования желваков сульфатов с вытянутой формой до сих пор является дискуссионным. Одни авторы [Bossio et al., 1978; Testa et al., 1996] считают, что они являются своеобразными псевдоморфозами по шевронным кристаллам гипса, другие [Shearman, 1985; Kasprzyk, Orti, 1998; Петротектонические..., 2000] связывают их формирование с тектоническими (пластическими) деформациями, а третьи [Shearman, 1985; Nanfita, 2008] говорят о связи с преобразованием (растворением) осадка под действием литостатического давления. Наши наблюдения показывают, что морфология желваков определяется количеством сульфатного материала, а также анизотропией минералообразующей среды. Так в глинисто-карбонатной «матрице» растущие желваки, получающие равномерное питание со всех сторон и не ограниченные в пространстве, характеризуются существенно сферической формой. В случае незначительного количества несulfатного материала желваки имеют форму воздушного шара и растут в направлении обогащенной водой кровли слоя – вплоть до параллельно-шестоватого агрегата. Такое явление получило название геометрического отбора [Григорьев, Жабин, 1975]. В ярко выраженной слоистой среде желваки имеют форму линз, что может являться результатом соответствующей симметрии питающей среды, определяемой законом Кюри [Шафрановский, 1954].

Таким образом, выявленные вещественно-структурные особенности карбонатных и сульфатных пород позволили проследить эволюцию осадконакопления в пределах каждого цикла и составить для них типовой идеализированный разрез (рис. 1). Некоторое сходство в строении карбонатно-сульфатных эвапоритов отмечено в разрезе мессиния (верхний миоцен) северных Апеннин [Vai, Ricci-Lucchi, 1977], формации Канган (нижний триас) Персидского залива [Zamannejad et al., 2013] и осадочного цикла современных солончаков Южной Австралии [Шрейбер и др., 1990], образование которых связывается с субаквальными условиями мелководий краевых частей высыхающего бассейна либо соляных озер,

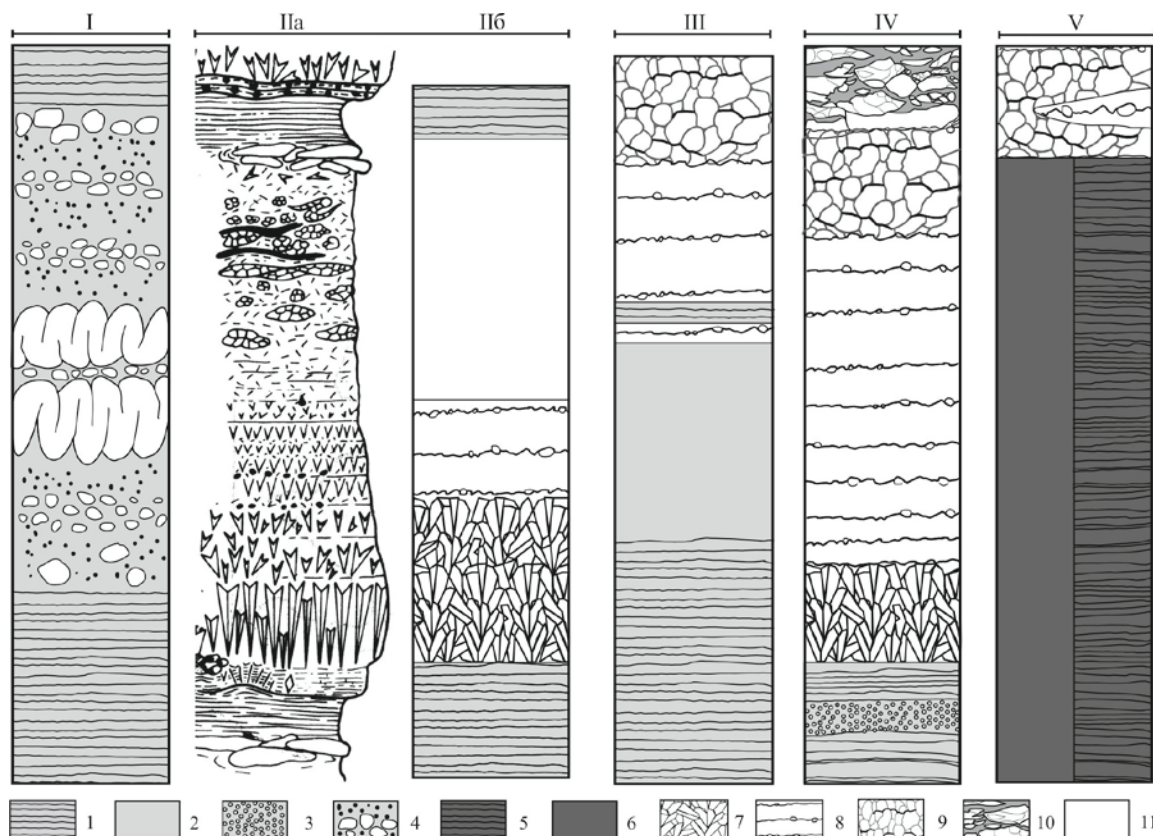


Рис. 1. Сопоставление схематизированных разрезов себхи (I) и осадочных циклов мессиния северных Апеннин (IIa – по [Vai, Ricci-Lucchi, 1977]; IIб – стилизованный), нижнего триаса формации Канган Персидского залива (III); IV, V – нижнепермских карбонатно-сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья (IV – филипповско-иренские и платформенные соликамские; V – соликамские (район Соликамской впадины)). Обозначения: 1-4 – структурно-текстурные типы карбонатов (1 – тонкослоистый пелитоморфный доломит; 2 – органогенно-детритовый доломит; 3 – массивный оолитовый доломит; 4 – массивный карбонат с рассеянными желваками); 5 – тонкослоистый мергель; 6 – массивный мергель); 7-11 – структурно-текстурные типы сульфатов (7 – с реликтовым шевронным строением; 8 – массивные; 9 – желваковые; 10 – линзовидно-желваковые; 11 – хаотические)

расположенных близко к морю. В отличие от субаквальных отложений карбонатно-сульфатные породы как современных (район Абу-Даби на берегу Персидского залива [Шрейбер и др., 1990]), так и древних (разрез нижнего пурбека (верхняя юра) южной Англии [Shearman, 1966]) себх не показывают четко выраженного циклического строения.

**Акцессорные минералы.** Кроме первичных доломита и ангидрита в разрезе карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья отмечены селадонит и говлит.

**Говлит** ( $(Ca_{1,69-1,82}Na_{0,04-0,02})B_5Si_{1,18-1,31}O_9Cl_{0-0,03}(OH)_5$ ) отмечен в виде конкреций (3-10 см) с тонкозернистой структурой в ледянопещерской пачке, обнажающейся в Ординской [Потапов, Паршина, 2010; Чайковский и др., 2010] и Кунгурской Ледяной пещерах [Калинина и др., 2015]. Наблюдаемая морфология говлита позволяет говорить о его образовании на стадии диагенеза. Признаки бывшего существования говлита отмечаются и в лунежской пачке [Чайковский и др., 2010]. Здесь на участках перекристаллизованного мелкозернистого (сахаровидного) гипса наблюдаются желваки мелкозернистого и радиально-лучистого строения, сложенные в настоящее время халцедоном.

**Селадонит** слагает выдержанные по простиранию слойки (до 4 см) в нижнем доломитовом прослое неволинской пачки, а также гнездовые и прожилковые выделения светло-зеленого цвета в гипсе. Высокое содержание калия и железа делает его близким к ферроселадониту с формулой  $(Mg_{1,63-2,10}Fe_{0,79-1,04})(OH)_2[Al_{0,19-0,35}Si_{3,61-3,85}O_5] \cdot K_{0,33-0,57} \cdot (H_2O)_n$  и свидетельствует об образовании при дефиците алюминия в осадках. Высокое содержание маг-

ния дает основание считать его продуктом химического осаждения и последующего пе-реотложения в процессе гидратации ангидрита.

**Геохимическая характеристика.** Исследование химического состава карбонатных и сульфатных эвапоритов показало, что филипповско-иренские породы характеризуются относительно простым составом (на долю  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  приходится более 95 мас.%), а соликамские – широким диапазоном вариации состава. Установленная относительная обогащенность карбонатов калием, а сульфатов – алюминием может отражать различную степень изменения алюмосиликатного материала.

Сопоставление среднего содержания микроэлементов в нижнепермских карбонатных и сульфатных породах с кларком морской воды [Quinby-Hunt, Turekian, 1983; Quinby-Hunt, Wilde, 1986; Brewer, 1975] показало их обогащенность элементами с низкой талассофильностью (Fe, Mn, Cr, Co, Ti, Mn, Sc – для филипповско-иренских пород и Ti, Cr, Sc, Zn, Sn – для соликамских) и обедненность – с высокой (B, Rb, Li, Sr, As, Au, Sb, Cs, U, W).

Сравнение содержания микроэлементов нижнепермских эвапоритов с кларком континентальных глин [Виноградов, 1962] показало близкие концентрации аксессуариев в соликамских мергелях и существенно низкие – в филипповско-иренских породах и соликамских сульфатах. Повышенные концентрации отмечены только для Zn, Bi, Te, Cd, I и In в соликамских породах, Cd, Sr, Au, Te, Bi, Li и Au, Sr в филипповско-иренских карбонатах и сульфатах соответственно. Такое соотношение говорит о том, что основная геохимическая специализация нижнепермских эвапоритов определяется не столько химизмом морской воды, сколько присутствием кластического материала, формирующегося за счет разрушения преимущественно фемических пород Уральской складчатой области.

Сопоставление среднего содержания микроэлементов терригенно-карбонатных и сульфатных соликамских пород с соответствующими разностями иренской свиты показало обогащенность соликамских сульфатов Zn, Bi, Te, Cd и In, что может свидетельствовать как об увеличении роли Уральского вулканогенного материала в эвапоритовой седиментации, так и о более восстановительных, благоприятных для осаждения сульфидов условиях, существовавших в соликамском бассейне.

Анализ распределения аксессуарных элементов вверх по разрезу филипповско-иренских карбонатных пачек показал, что большинство элементов характеризуется постепенным уменьшением содержания. Такая закономерность, в целом, может являться отражением прогрессирующей эвапоритизации бассейна и уменьшения поверхностного стока, несущего терригенный материал. Наблюдаемое на фоне общего убывающего тренда возрастание содержания некоторых элементов (Si, Y, Zr, Pb, W, Re, Tl, Sn, Ga, Ge, Cd, Mn, Fe, As, Ti, P, V, Cr, Be и Sb) в туйских доломитах может быть связано с временным распреснением лагуны в туйское время, а в сульфатах демидковской и неволинской пачек – приносом алюмосиликатного материала воздушными массами (пылевые бури).

Анализ распределения аксессуарных элементов в целом по разрезу кунгурских эвапоритов показал, что каждая ритмопачка характеризуется своей геохимической специализацией (рис. 2). Наблюдаемая эволюция может отражать периоды пересыщения вод этими компонентами (Sr, Co, Re, Te, Ni, Cu и Li в ранний, Ba в средний и W, Zn, Sn в завершающий), однако допускается и изменение состава областей сноса.

Анализ распределения микроэлементов по разрезу соликамских пород показал, что максимальные концентрации большинства из них приурочены преимущественно к нижней и средней частям (рис. 3). Наблюдаемая картина объясняется нами осаждением малых элементов, сконцентрированных при испарении в рапе кунгурского палеобассейна, в результате их сорбции глинистыми минералами, поступившими в водоем в начале соликамского времени. Предполагается, что зафиксированное накопление ряда аксессуариев в

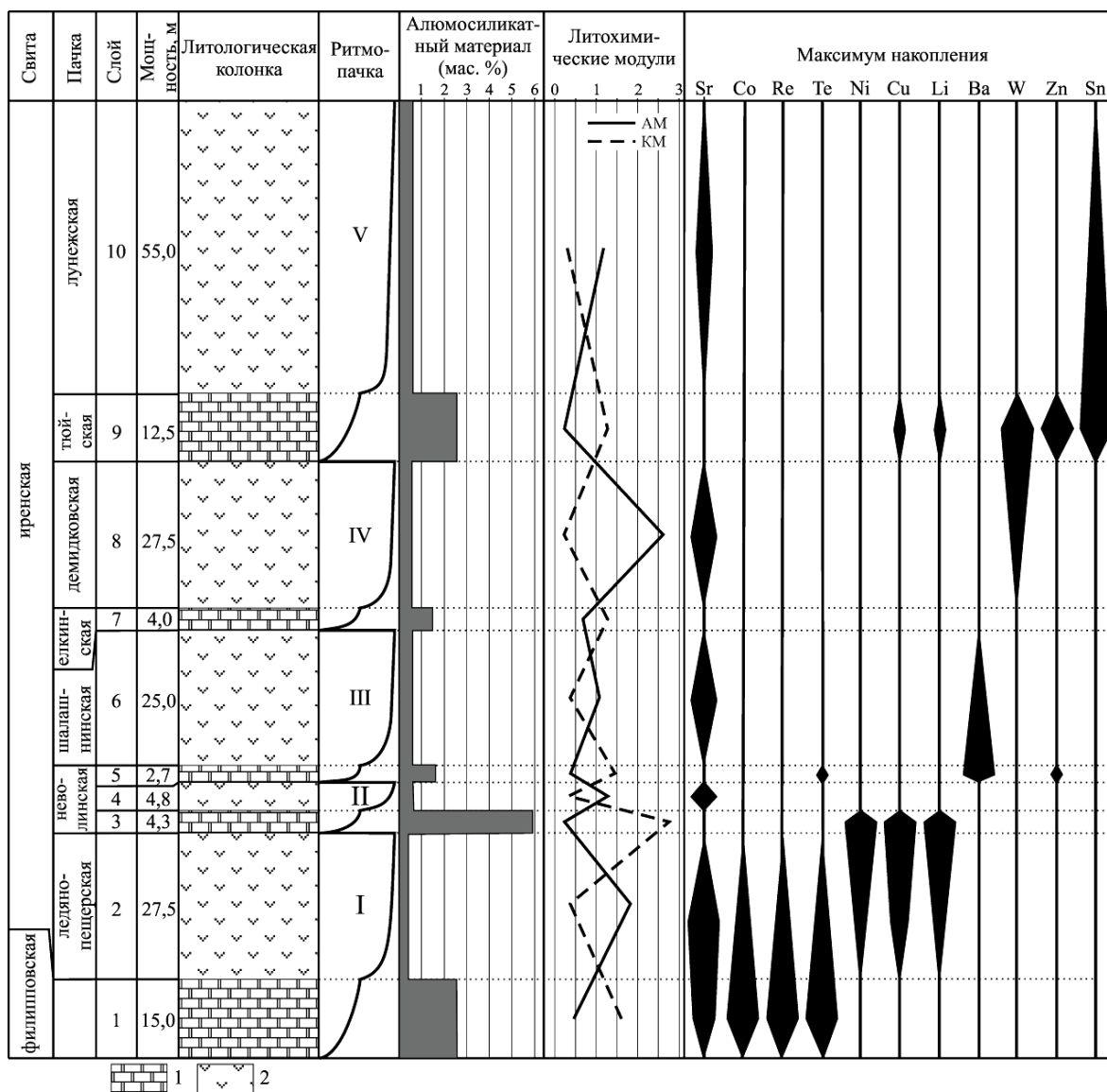


Рис. 2. Геохимическая эволюция кунгурских эвапоритов. Обозначения: 1 – карбонаты; 2 – сульфаты. Литохимические модули (АМ – алюмокремниевый; КМ – калиевый [Юдович, Кетрис, 2000]) нормированы к среднему

сульфатных прослоях связано с их осаждением в результате сульфат-редукции (Ni, Cu, Mo, Re, I, Sb, Sn, Pb, Bi) и в качестве изоморфной примеси в гипсе и карбонате (Sr и Ba).

Использование дискриминационных диаграмм Th/Sc–Zr/Sc [McLennan, 1993], Sc/Th–La/Sm [Geochemistry..., 2003], Th/Sc–Sc [Тейлор, МакЛеннан, 1988], Th/Co–La/Sc [Cullers, 2002] позволяет говорить, что во время формирования филипповско-иренских отложений на палеоводосборах происходил размыв пород преимущественно среднего, в меньшей мере основного состава, тогда как при накоплении соликамских карбонатов размывались породы среднего и кислого состава.

**Изотопная характеристика.** Распределение величин  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  позволило разделить нижнепермские карбонаты на две группы. Первая группа представлена карбонатами филипповской и иренской свит ( $\delta^{13}\text{C}$  варьируется от 5,9 до 7,5‰, а  $\delta^{18}\text{O}$  – -6,9÷-1,3‰), а вторая – соликамской (-6,9÷-1,4‰ для  $\delta^{13}\text{C}$  и -11,5÷-3,0‰ для  $\delta^{18}\text{O}$ ) (рис. 4). Такой состав карбонатов нетипичен для карбонатов современных эвапоритов, в которых  $\delta^{13}\text{C}$  колеблется в пределах -4,5÷5,5‰, а  $\delta^{18}\text{O}$  – 1,0÷5,0‰ [Hudson, 1977], но отмечается в нижнекембрийских соленосных отложениях Иркутского амфитеатра [Vinogradov et al., 2006] и девонских породах Припятского прогиба [Махнач и др., 1995; Махнач и др., 2013]. Схожие значения  $\delta^{18}\text{O}$  отмечены в пермских эвапоритах цехштейна [Clark, 1980; Botz, Muller, 1987; Below,

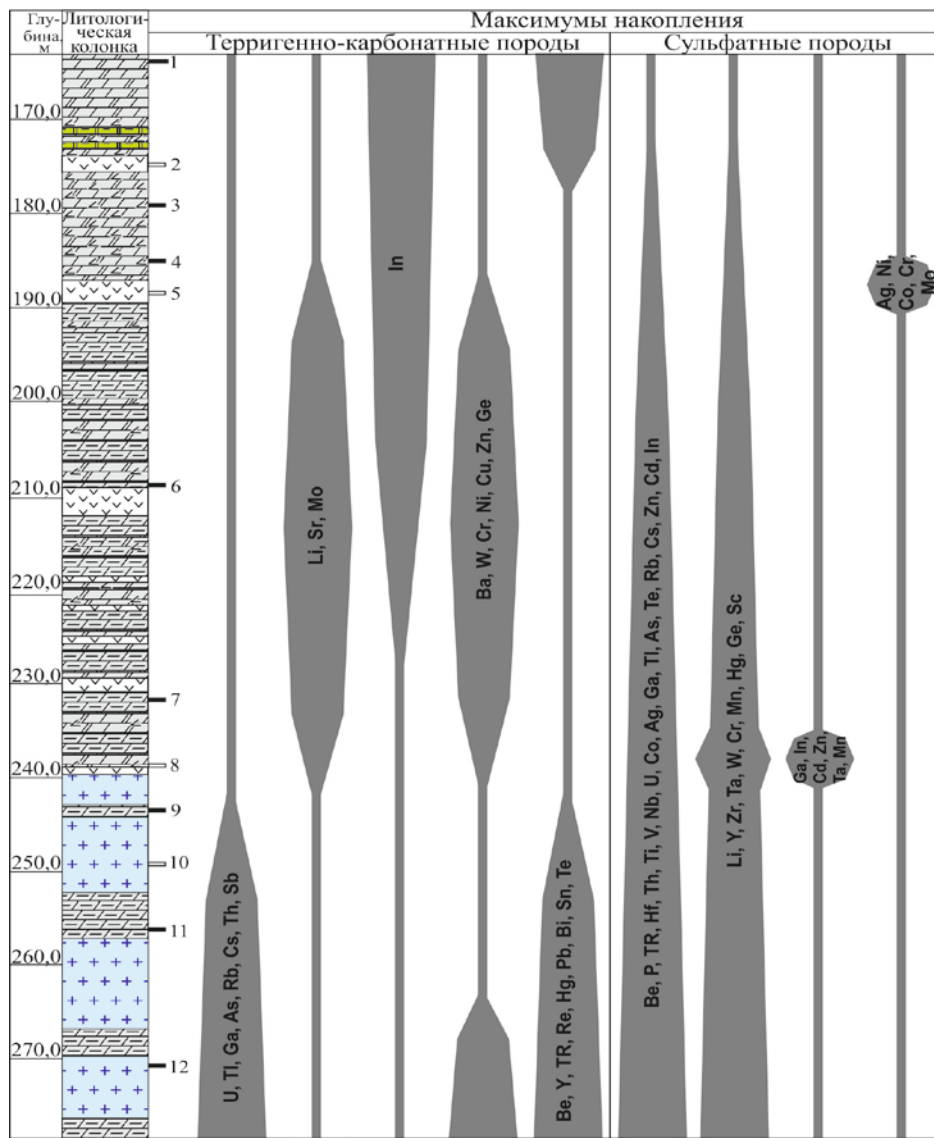


Рис. 3. Геохимическая эволюция пород соликамской свиты. Обозначения: 1 – доломит глинистый; 2 – мергель; 3 – мергель глинистый; 4 – мергель доломитисто-известковый и известкосто-доломитовый; 5 – гипс; 6 – каменная соль; 7-8 – номера образцов (7 – сульфатных; 8 – терригенно-карбонатных)

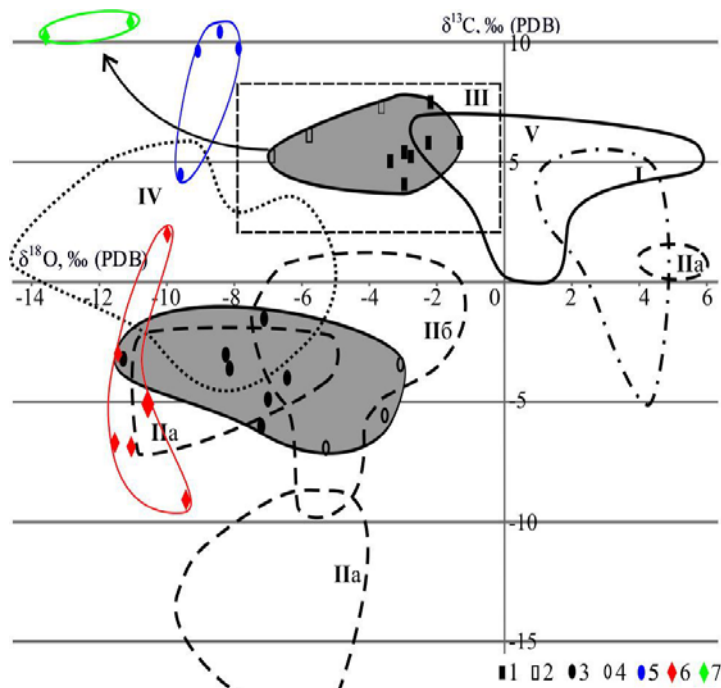


Рис. 4. Распределение величин  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в первично-осадочных и вторичных карбонатах Пермского Прикамья. Обозначения: 1, 2 – карбонаты иренской и филипповской свит (1 – пелитоморфные; 2 – оолитовые); 3, 4 – карбонаты соликамской свиты (3 – Соликамской впадины; 4 – платформенной части); 5 – перекристаллизованный остаточный доломит; 6 – инкрустационный доломит; 7 – инкрустационный кальцит; I-V – области вариации изотопного состава карбонатов (I – современных эвапоритов (по [Hudson, 1977]); II – девонских соленосных отложений Припятского прогиба (по [Махнач и др., 1995; Махнач и др., 2013]: а – несолевые породы галитовой субформации верхней соленосной формации; б – калиеносная субформация верхней соленосной формации); III – карбонаты эвапоритов цехштейна (по [Clark, 1980; Botz, Muller, 1987; Below, 1992]); IV – нижнекембрийских соленосных пород Иркутского амфитеатра (по [Vinogradov et al., 2006]); V – сакмарско-казанские доломиты востока Русской плиты (по [Сунгатуллин и др., 2014])

1992] и востока Восточно-Европейской платформы [Кулешов, Седаева, 2009; Кулешов, 2012; Сунгатуллин и др., 2014]. Приведенные данные позволяют полагать, что отличие состава кислорода карбонатов пермских отложений от карбонатов эвапоритов современных и более древних бассейнов обусловлено преимущественно различием изотопного состава кислорода вод фанерозоя [Veizer, 1999; Same, 2007]. Доломиты филипповской и иренской толщи в целом характеризуются высокими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  (5,9-7,5‰) и  $\delta^{18}\text{O}$  (-6,9÷-1,3‰), но показывают отличие в изотопном составе кислорода тонкослоистых пелитоморфных и массивных оолитовых разностей. Так в первых  $\delta^{18}\text{O}$  варьируется от -3,5 до -1,3 ‰, а во вторых – от -6,9 до -3,6 ‰. Наблюдаемое отличие может быть связано с образованием разностей в бассейне с различной гидродинамической активностью и глубиной бассейна седиментации: оолитовые доломиты формировались в зоне активной циркуляции вод и на малых глубинах, а пелитоморфные – в более глубоких и застойных условиях.

Карбонаты соликамской свиты Соликамской впадины отличаются от более молодых кунгурских резко легкими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  (-6,0÷-1,4‰) и  $\delta^{18}\text{O}$  (-11,5÷-6,6‰), что говорит о существенном изменении условий седиментации в соликамском эвапоритовом бассейне. Предполагается, что причиной таких низких значений  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  может являться привнос в бассейн седиментации изотопно-легких поверхностных вод, насыщенных растворенной почвенной углекислотой. О возможности этого может свидетельствовать высокое содержание в них терригенного (алевропелитового) материала и наличие мелких углефицированных растительных остатков.

Соликамские карбонаты платформенной части имеют близкий к одновозрастным карбонатам Соликамской впадины изотопный состав углерода (-6,9÷-3,9‰), но отличаются от них более тяжелым кислородом (-5,3÷-3,0‰). Повышенные значения  $\delta^{18}\text{O}$ , вероятно, обусловлены более интенсивным испарением по периферии соликамского бассейна. «Сохранность» изотопно-легкого углерода при этом могла обеспечиваться активно протекающими процессами окисления органического вещества в мелководных условиях. На возможность данного механизма указывают трещины усыхания с одной стороны и строматолитовые постройки – с другой. Наблюдаемое облегчение кислорода и углерода вверх по разрезу может говорить о распреснении вод бассейна седиментации за счет поступления поверхностных вод, насыщенных растворенной почвенной углекислотой.

Таким образом, *филипповско-иренские эвапориты Пермского Прикамья формировались в обширном мелководном бассейне в течение 5 циклов, каждый из которых характеризуется закономерной сменой пелитоморфных/оолитовых известковистых доломитов шевронными, неяснослоистыми и желваковыми ангидритами. Химический облик эвапоритов определяется практически мономинеральной седиментацией талассофильных элементов и концентрацией акцессориев в алюмокластическом материале. Установленный ряд максимумов концентрации некоторых микроэлементов (халькофильные → халькофильно-литофильные → литофильные) в течение кунгурского века может отражать последовательное разрушение фемических, а затем более сиалических комплексов Уральско-го орогена. Соликамский этап связан с постепенным распреснением реликтовой кунгурской лагуны, происходившим за счет «лавинного» поступления поверхностных вод и терригенного материала с горно-складчатого Урала. Связь с бореальным морем появилась только в конце соликамского времени, о чем свидетельствует появление морской фауны. Привнос глинистого материала в водоем в начале соликамского времени привел к сорбции большинства микроэлементов, сконцентрированных при испарении в рапе кунгурского палеобассейна. Накопление акцессориев в сульфатных прослоях происходило за счет их осаждения в результате сульфат-редукции (Ni, Cu, Mo, Re, I, Sb, Sn, Pb, Bi) и в качестве изоморфной примеси в гипсе и карбонате (Sr и Ba). Обогащенность соликамских сульфа-*

тов Zn, Bi, Te, Cd и In, в отличие от предшествующих иренских карбонатов и сульфатов, может свидетельствовать как об увеличении роли Уральско-го вулканогенного материала в эвапоритовой седиментации, так и о более восстановительных, благоприятных для осаждения сульфидов условиях, существовавших в соликамском бассейне.

## **2. Процессы начального гипергенеза карбонатных и сульфатных эвапоритов**

В начале раздела изложена история и состояние изученности процесса гидратации ангидрита, в частности проблемы ангидрит-гипсового превращения, связи тектонических деформаций с увеличением объема породы в результате гидратации ангидрита и петрографии вторичных гипсов.

**2.1. Специфика гидратации ангидритовых толщ.** Изучение строения сульфатных толщ нижнепермских эвапоритов в разрезе «Ледяная гора» и Шубинского месторождения показало, что гипсы приурочены к верхней части ангидритовых пачек, контакту с прослоями известковистых доломитов, а также локальным участкам внутри ангидритовой толщи. Мощность зоны гипсификации увеличивается в направлении к бровкам долин рек и логов вплоть до полного исчезновения ангидрита в составе пачки. Такое строение сульфатных массивов согласуется с выводами предыдущих исследователей [Howitt, 1964; Bailey, 1965; Даровских, Кудряшов, 2001] и подтверждает возможность гидратации ангидрита не только при его взаимодействии с нисходящими водами, но и пластовыми.

*Специфика гидратации мономинеральных ангидритовых толщ.* Изучение зоны ангидрит-гипсового перехода в гротах Кунгурской Ледяной пещеры и керне скважины «Ледяная гора» показало, что граница раздела постепенная. При переходе от ангидрита к гипсу последний сначала встречается вдоль редких согласных и секущих трещин, где он слагает прожилки зонального строения: мелкозернистые в центре и параллельно-шестоватые пластинчатые по периферии. Дальнейшая гидратация приводит к тому, что массив постепенно приобретает штокверковое, а затем брекчиевидное строение. Реликты ангидрита в начале этого процесса характеризуются остроугольной формой, а в конце – сферической. Краевые части последних «расшелушены» по системе концентрических трещин, отражающих увеличение объема при гидратации и возникновении ослабленных проницаемых зон. Отмечено, что гипс при этом наследует элементы слоистости и общий рисунок распределения глинисто-карбонатного материала. Наследование желваковой структуры ангидрита гипсом при гидратации было отмечено и на микропетрографическом уровне, несмотря на то, что гипсификация развивается по серии секущих зон.

Наряду с мелкозернистым и пойкилитовым гипсом отмечены согласные прожилки селенита без просечки, свидетельствующие о субвертикальном растяжении и расслоении породы, которые связаны с гидратацией ангидрита.

Для гипсовой породы нередко характерно, так называемое, сетчатое строение: апоангидритовые желваки «перемяты» и разбиты на блоки вплоть до появления «лепестковых» структур. Представляется, что ключом к пониманию природы таких структур могут быть результаты изучения образцов гипса, отобранных из осыпи в подводной части Ординской пещеры. Их поверхность осложнена коррозионными радиальными и концентрическими каналами, которые могут отражать характер распределения деформаций внутри обломков в процессе гидратации, сопровождаемой увеличением объема. Таким образом, увеличение объема породы при гидратации ангидрита приводит к относительному перемещению блоков, фрагментации породы и преобразованию желваковой текстуры в сетчатую.

Структурные наблюдения показали, что гидратация ангидрита приводит к появлению системы трещин (кливажа) как в самих ангидритовых прослоях, так и в карбонатных слоях. На склонах долин рек могут появляться трещины бортового отпора и оседание блоков, часть которых нередко наклонена в сторону реки. В Кунгурской Ледяной пещере при гид-

ратации ангидрита, происходящей вдоль маломощных слоев глинисто-карбонатного материала, происходит расслоение и обрушение кровли [Андрейчук и др., 2013].

*Специфика процессов перекристаллизации гипсов.* Среди гипсов, образовавшихся при гидратации практически мономинеральной ангидритовой породы, выделяются три структурно-текстурных типа (рис. 5). Первые характеризуются массивной текстурой и микро-, мелкокристаллической структурой, вторые – петельчатой текстурой (иногда «петли» ориентированы под углом к слоистости), а в третьих пластинчато-шестоватый гипс развит вдоль глинистых слоев и ответвляющихся линейных и плоскостных каналов, где он образует радиально-лучистые агрегаты.

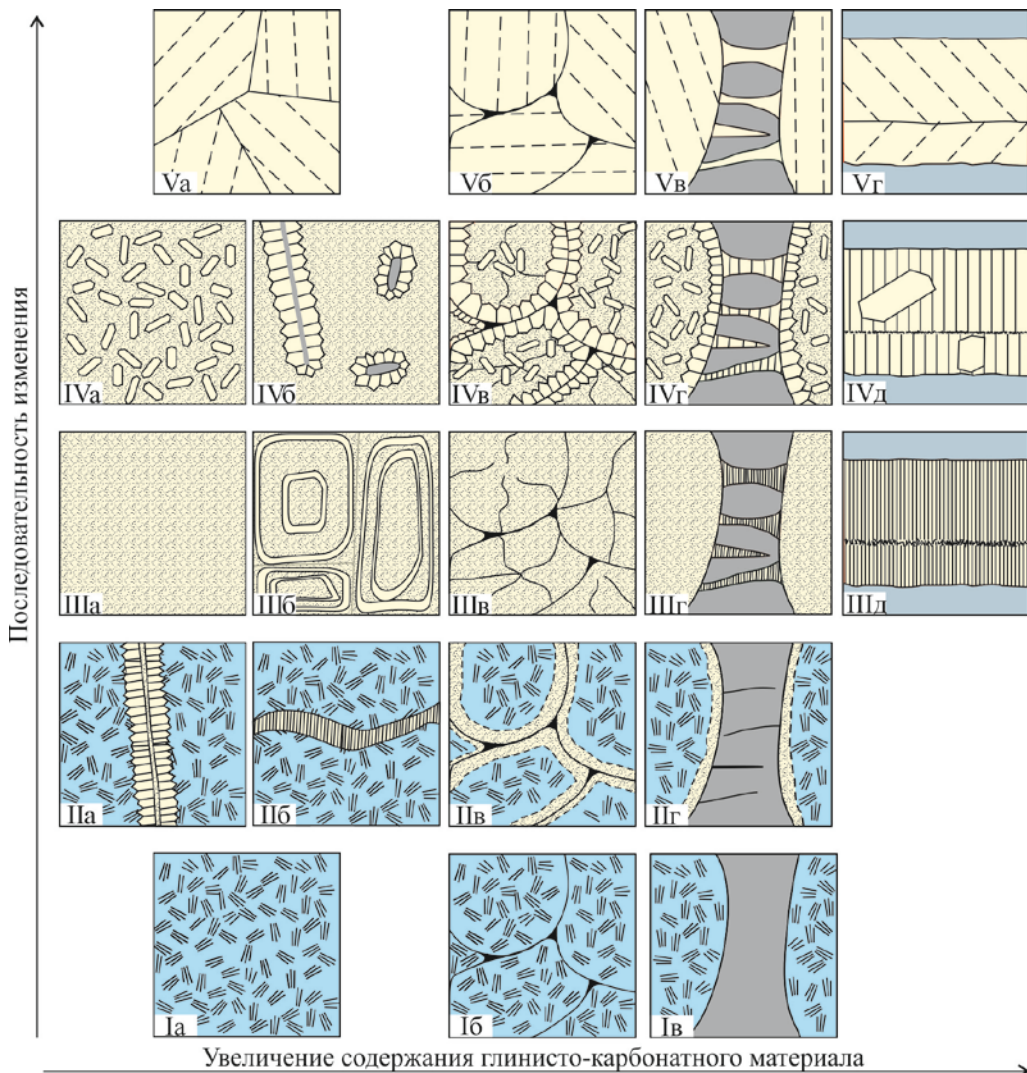


Рис. 5. Последовательность гидратации и перекристаллизации ангидритосодержащих пород: I – ангидритовая порода (а – мономинеральная массивная; б – желваковая; в – редкие желваки в глинисто-карбонатном матриксе); IIа – «метасоматический» прожилок гипса; IIб – прожилок селенита без просечки; IIв-г – мелкозернистая гипсовая кайма; IIIа-в – гипсовая порода (а – массивная; б – петельчатая; в – сетчатая); IIIг – прожилки селенита без просечки, примыкающие к желвакам; IIIд – селенитовая жила с просечкой; IV – метакристаллы гипса (а – в основной массе; б – вдоль глинисто-кар-

бонатных включений и капиллярных каналов; в – по периферии и в центре желваков; г – по периферии желваков и в прожилках селенита; д – по жилам селенита); Va-г – крупно- и гигантозернистый гипс

Появление петельчатых разностей гипсовых пород сульфатно-карбонатных эвапоритов Пермского Прикамья связывается с перекристаллизацией по системе трещин отдельности. Ориентировка «петель» под острым углом к слоистости позволяет говорить о связи со сдвиговыми деформациями [Чайковский и др., 2008]. Наличие ритмичности позволяет предполагать прерывистый характер межпластовых перемещений, обусловивший пульсационный характер диффузии водного раствора. Перекристаллизация гипса вдоль каналов и тонких слоев говорит о напорном характере растворов и их миграции по системе капилляров. Таким образом, отмеченные структурно-текстурные особенности гипсовых пород Пермского Прикамья свидетельствуют о том, что перекристаллизация может происходить по-разному: диффузионно – по всему объему массива и от трещин во внутрь отдельных

блоков, а также инфильтрационно – вдоль трещин.

Процессы перекристаллизации могут привести к образованию гипса с крупно-, гигантокристаллической структурой. Один из таких участков вскрывается в ходе Хрустальный Кунгурской Ледяной пещеры, где размер индивидов нередко превышает 50 см.

*Специфика гидратации сульфатно-карбонатно-глинистых толщ.* Здесь гипс слагает желваки, к которым примыкают селенитовые прожилки без просечки, свидетельствующие о субвертикальном расслоении глинистого материала. Зафиксированное на отдельных примерах увеличение объема породы на 10-27% в отличие от теоретических 54-67% [Косыгин, 1940] и наличие большого числа жил с просечкой и без нее свидетельствует о частичном выносе растворенного  $\text{CaSO}_4$  за пределы пласта.

Структурно-текстурный анализ желваков гипса позволил выделить несколько стадий его преобразования. Для отдельных гипсовых желваков зафиксирована полосчатая текстура, обусловленная чередованием микро- и мелкокристаллического гипса. Наличие таких полос позволяет предполагать, что перекристаллизация происходила вдоль деформируемых ослабленных зон, формирующихся при послойном скольжении.

Наряду с прожилками селенита без просечки в сульфатно-карбонатно-глинистых породах отмечено широкое развитие параллельно-шестоватых агрегатов с одной или несколькими просечками, зонами перегиба (коленообразными и кинкбандами), ортогональным и косым расположением волокон. При это форма жил может быть простой, зигзагообразной и ветвящейся (с апофизами). Анализ строения таких прожилков [Bundy, 1956; Жабин, 1979; Чайковский и др., 2008] указывает на значительное влияние тектонических движений при формировании жил. Так отсутствие просечки говорит о росте гипса синхронно с раскрытием полости, а ее наличие свидетельствует о расширении трещин за счет механического воздействия растущих кристаллов. Появление зигзагообразных жил и примыкающих под острым углом апофиз говорит и об участии в их формировании тектонических подвижек. Агрегаты с косой ориентировкой волокон, обратно направленной к кливажу во вмещающих породах, а также жилы, осложненные кинкбандами, свидетельствуют о проявлении тектонических движений и после формирования селенитовых жил. При перекристаллизации селенита образуются агрегаты пластинчатого гипса (ордита) с параллельно-шестоватым или неориентированным строением.

Таким образом, анализ строения сульфатных пород нижнепермских эвапоритов Пермского Прикамья показал, что схема их гипергенного преобразования (см. рис. 4) отличается от схемы преобразования ангидритовых пород британского пурбека [West, 1979]. Специфика гидратации ангидрита и последующей перекристаллизации гипса определяется содержанием и распределением сульфатного материала в породе и сопровождается формированием специфических структур.

*Минералогия зон гидратации.* Акцессорные минералы гипсовых пород карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья представлены целестином, флюоритом и борными минералами. Первый отмечен во всех сульфатных пачках иренской свиты, где он слагает одиночные ксеноморфные микровыделения и их скопления. Второй был зафиксирован в крупно-, гигантокристаллическом гипсе ледянопещерской пачки, где он слагает мелкие кубические индивиды. Борные минералы были отмечены нами в ледянопещерской, шалашнинской и демидковской пачках иренской свиты кунгура, где они слагают мелкие (до 5 мм) желваки с метельчатой и сноповидной структурой. Химический и рентгенофазовый анализ борных минералов показал их принадлежность к пробертиту и студенициту.

*Геохимия зон гидратации.* Парный корреляционный анализ малых элементов ангидритовых, гипс-ангидритовых и гипсовых пород выявил три группы. Первые (Fe, Ni, Ge, Sr, Zn, Ag, Tl, Bi, Be) характеризуются повышенным содержанием в ангидрите и существенно

более низким в гипсе, что может говорить о подвижности этих компонентов в процессе гипергенного преобразования сульфатных толщ. Вторые (Li, Ti, Co, Y, Zr, Sb, Cs, TR, Th, U) характеризуются повышенными содержаниями в переходных гипс-ангидритовых разностях. Их накопление может быть связано со сменой кислотно-щелочных условий на фронте гидратации ангидрита. Третьи (Se, Cd, Hf) показали отсутствие закономерностей в пространственном распределении, что говорит об их автономном поведении.

Сопоставление состава крупно- и гигантозернистых разностей гипса с исходной мелкозернистой породой показало, что перекристаллизация сопровождается выносом Li, Rb, Cs, легких и средних лантаноидов и накоплением Sn, P, Cr, As, Mo, тяжелых лантаноидов. Такое перераспределение лантаноидов, вероятно, отражает щелочной состав растворов, приведших к перекристаллизации гипса и выносу легких и средних лантаноидов [Химия..., 1978]. Увеличение содержания Sn, P, Cr, As и Mo в гигантокристаллическом гипсе может указывать на то, что данное преобразование происходило в жарких условиях и значительной степени окисления, обеспечивавших подвижность этих элементов.

**2.2. Специфика преобразования карбонатных пород в процессе гидратации ангидритовых толщ.** Подчиненное положение карбонатных пачек в разрезе эвапоритов кунгура Пермского Прикамья определяет их механическую и гидрохимическую зависимость от процессов, происходящих в более легкорастворимых и деформируемых сульфатах.

*Литолого-минералогическая характеристика.* Преобразование пелитоморфных и оолитовых доломитов приводит к выщелачиванию известковой составляющей, перекристаллизации доломита (пелитоморфные разности приобретают массивную, сгустково-комковатую текстуру, а оолитовые – вторичную пористость и крустификационный кальцитовый цемент) и переотложению элементов, находившихся ранее в виде изоморфной примеси, в виде собственных минеральных фаз (сидерит, целестин, барит, гидроксиды железа и марганца и др.). Присутствие минералов железа и марганца с различной степенью окисления (карбонаты и гидроксиды), свидетельствуют о неравновесности условий, в которых происходило изменение исходных пород. Об этом могут свидетельствовать и значительные вариации состава кальцита, доломита и сидерита.

*Геохимическая характеристика.* Сопоставление состава первично-осадочных тонкослоистых пелитоморфных и массивных оолитовых разностей доломитов неволинской пачки в разрезе «Ледяная гора» с преобразованными породами показало, что при изменении карбонатов наряду с выносом большинства элементов происходит накопление Co, Cu, Zn, Se, Sr, Cd, Sb, Hg при перекристаллизации и B, Sc, Co, Cu, Se, Sr, Sn, Sb, Te, Re, Au, Hg, Pb, Bi при выщелачивании. Парный корреляционный анализ показал, что акцессорные элементы потеряли корреляционную связь с петрогенными оксидами, что свидетельствует о трансформации алюмосиликатного и карбонатного вещества и высвобождении малых элементов. Находки целестина, барита, боратов и пирита дают основание предполагать, что часть элементов (Sr, Ba, B, Fe) образует самостоятельные фазы, тогда как халькофильные (Pb, Bi, Re, Te, Co, Sb, Cu) могут входить в состав сульфидов. Некоторые элементы (Mn, Fe, W, Mo, Zn, As, Sn, P) могут образовывать вторичные фосфаты, молибдаты, вольфраматы и гидроксиды, о чем свидетельствуют находки ванадинита и повеллита в ассоциации с гидроксидами железа и марганца на Шубинском месторождении гипса [Калинина, Чайковский, 2012].

Таким образом, *специфика гидратации ангидрита и последующей перекристаллизации гипса определяется содержанием и распределением сульфатного материала в породе и сопровождается структурно-текстурной перестройкой (сетчатые, петельчатые, кокардовые), образованием прожилков селенита («замещения», выполнения синхронно раскрытию полостей, отложения в пространстве, освобожденном при активной механиче-*

ской роли растущего агрегата) и деформаций (трещины кливажа, бортового отпора и отслоения). Сопряженные с ними карбонатные породы декальцифицируются и перекристаллизуются. Перераспределение элементов происходит в неравновесных условиях и многократно (на фронте гидратации ангидрита, при перекристаллизации гипса и эпигенезе карбонатов) и сопровождается образованием скоплений флюорита, целестина, боратов.

### **3. Процессы зрелого гипергенеза карбонатных и сульфатных эвапоритов**

В начале раздела изложена история и состояние изученности продуктов гипергенного преобразования эвапоритов на территории Пермского Прикамья, которые в литературе описаны как «карстовые брекчии».

**3.1. Гипергенез сульфатных толщ.** Изучение обнажения сульфатных пород лунежской пачки в долине р. Судинки позволило выделить зону коренных пород (мелкозернистая гипсовая порода), структурного элювия (гипсовая порода, дезинтегрированная до блоков глыбово-щебневой размерности) и элювия (слабосвязанный гипсовый дресвяно-щебневый материал с алевропелитовым заполнителем карбонатно-сульфатного состава) и линейных клиновидных карманов. Такое строение массива дает основание полагать, что основным процессом разрушения гипсов является физическое выветривание. Оно развивается с поверхности в виде площадной коры или более интенсивно – вдоль ослабленных линейных зон, чьи прямолинейные очертания говорят об их приуроченности к тектоническим элементам. Зафиксированные в зоне структурного элювия корочки натечного облика, сложенные пылеватыми субидиоморфными зернами гипса, свидетельствуют о значительной роли в процессе выветривания суффозии.

Изучение морфологии аутигенного гипса позволило установить основные пути преобразования гипсового материала: пылеватых «натечков», основной массы сахаровидных зерен гипсовой породы и прожилков перекристаллизации – для каждого из которых выявлена своя специфика (рис. 6). Все они проходят через межзерновое растворение и высвобождение зерен, последующую регенерацию и структурную коррозию. Иногда формируются промежуточные брекчиевидные агрегаты. Такая схема преобразования гипса отражает сложность проявления процессов гипергенеза гипса (растворение – регенерация) на уровне зерен.

Наличие кристаллов и агрегатов кальцита в верхней части карманов и блочно-зональных с признаками усыхания – в нижней позволяют предполагать его образование из истинных и коллоидных растворов соответственно.

Отмеченные барит, целестин, гидроксиды железа и марганца говорят о том, что разрушение исходных пород приводит к высвобождению и перегруппировке акцессорных элементов. Присутствие ванадия и молибдена в составе гидроксидов указывает на преобразование в окислительных условиях жаркого климата, а появление галенита, самородной меди и серебра на их поверхности связывается с эпигенетическим редокс-обменом между твердыми гидроксидами марганца и инфильтрационными растворами [Силаев, 2008].

**3.2. Гипергенез карбонатных толщ.** Поверхность Казаковской горы покрыта мощным (до 60 м и более [Плюснин, 1947]) плащом сильно выветрелых, кавернозных пород доломитового и кальцит-доломитового состава, в которых иногда отмечаются реликты исходных пелитоморфных известковистых доломитов туйской пачки. Макро- и микроскопическое изучение образцов позволило проследить фрагменты изменения карбонатной породы, которые могут быть выстроены в генерализованную последовательность [Чайковский и др., 2010] (рис. 7): 1) образование доломитовых прожилков перекристаллизации по системе трещин; 2) выщелачивание пелитоморфного материала с образованием кавернозного агрегата; 3) уплотнение остаточного материала с образованием брекчий уплотнения с

субслоистой текстурой; 4) отложение вторичных кристификационных доломита и кальцита. Такое строение отражает вторичную природу карбонатных пород, сформировавшихся за счет выщелачивания и перекристаллизации известковистых доломитов.

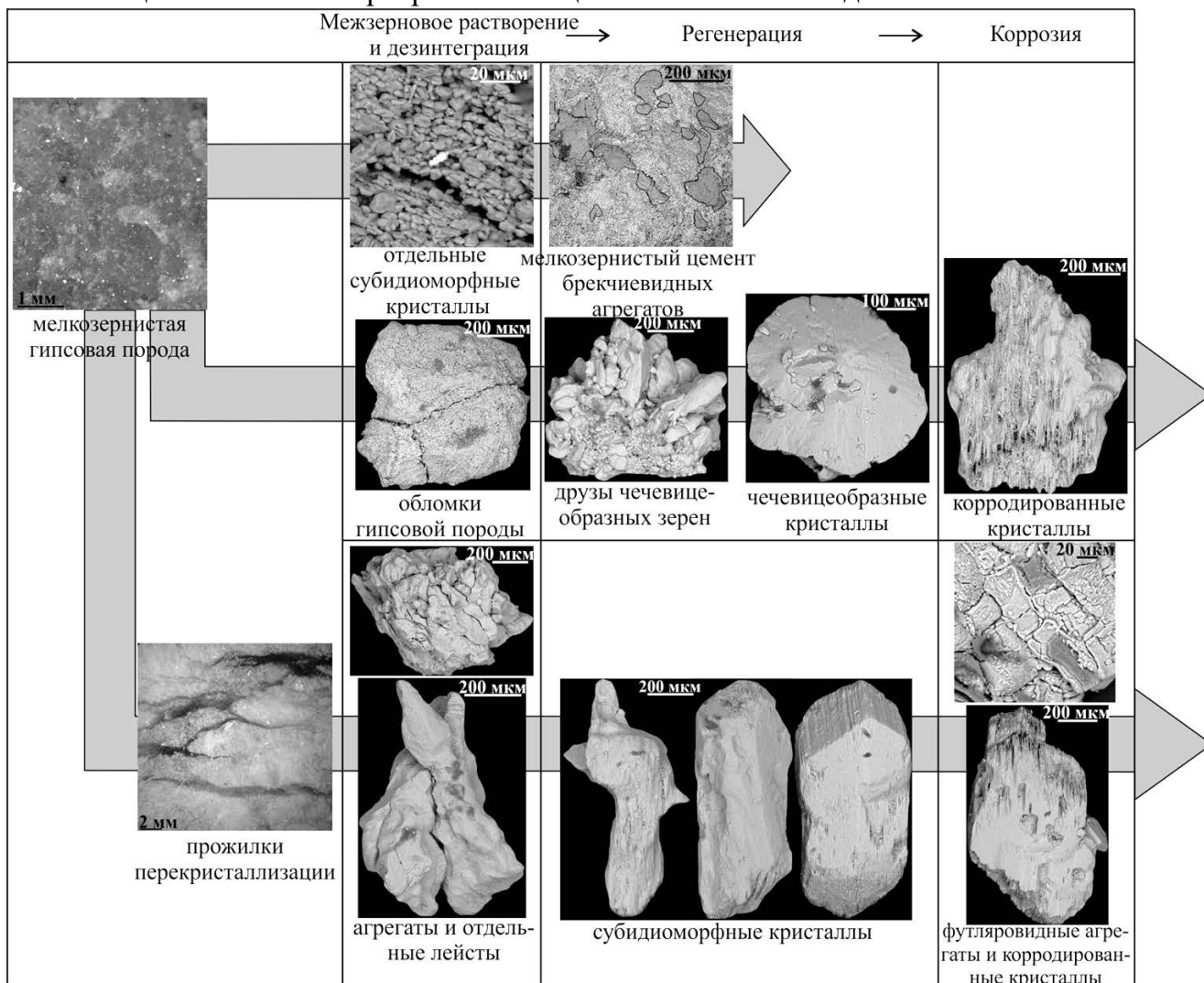


Рис. 6. Схема процессов преобразования остаточного гипсового материала

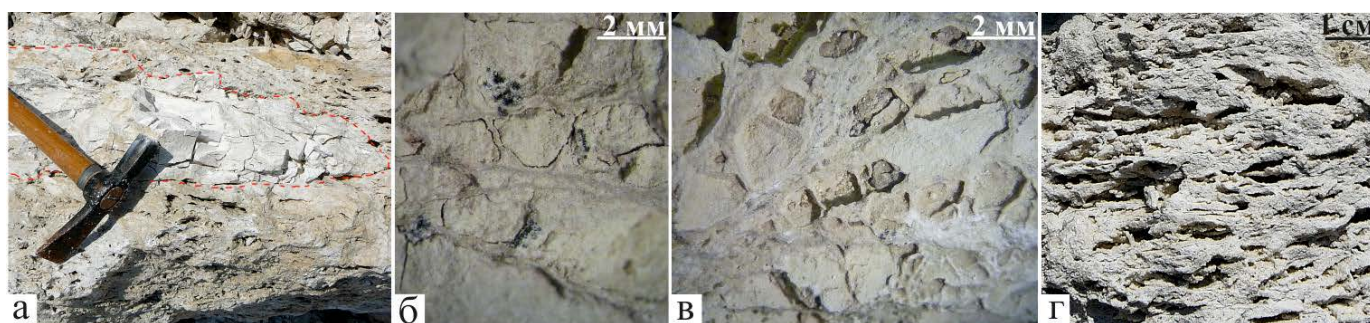


Рис. 7. Детали строения остаточной карбонатной породы на Казаковской горе: а – реликт пелитоморфного известковистого доломита туйской пачки; б, в – в различной степени выщелоченные породы; г – брекчия уплотнения с ориентированной (субслоистой) текстурой

В пределах карбонатной толщи отмечены участки с флюоритом (блочко-зональные гексаэдры), который откладывался после доломита и перед скаленоэдрами кальцита. Изучение его геохимических особенностей [Чайковский и др., 2005, 2010] показало относительную обогащенность тяжелыми редкоземельными элементами, что может указывать на связь с подземными водами, инфильтрующимися через коры. Такое положение говорит об образовании флюорита при гипергенезе геохимически специализированных известковистых доломитов туйской пачки, провоцирующего пространственную перегруппировку

рассеянного в породе фтора. Верхняя часть коры выветривания обогащена кальцитом, (нитевидный, трубчатые футляры на корнях и корочки шестоватого строения), морфология которого позволяет связывать его с осаждением на испарительном барьере из поднимающихся за счет капиллярных сил поровых растворов.

Схожее строение остаточных карбонатов отмечено на Шубинском месторождении, что позволяет предполагать близкий сценарий их гипергенного изменения. Пространственное распределение выявленных минералов в карбонатной коре позволяет выделить три зоны с характерной основной и акцессорной минерализацией (таблица).

Таблица

Минералого-геохимическая зональность коры выветривания по карбонатам Шубинского месторождения гипса

Минеральная зона и подзона		Основные минеральные фазы и их морфология	Акцессорные минералы	
			Самостоятельные	На орг. пленке
Железо-марганцевой минерализации	Гидроксидов марганца	Почковидные агрегаты	Барит, латунь, железо (с хромом), медистое серебро, касситерит, тенорит	
		Одиночные глобулы и дендриты	Барит, олово, латунь, целестин	
	Гидроксидов железа	Охристые гидроксидно-железистые	Барит, пирит, железо	
		Почковидные железо-марганцевые	Барит, целестин, латунь	Сфалерит
		Пленочные железо-кремнистые	Барит	
Выщелачивания кальцита	Доломитовая	Перекристаллизованная доломитовая порода	Барит, пирит, цинк, золото	Висмут
Отложения кальцита	Кальцит-доломитовая	Перекристаллизованная доломитовая порода с гнездовым кальцитом	Барит, флюорит	

Поверхность остаточных доломитов осложнена врезами, выполненными стратифицированным полимиктовым песчаным материалом с многочисленными обломками переотложенных карбонатных пород. Наличие градационной слоистости и обломков местных пород позволяет предполагать их принадлежность к отложениям временных потоков. Их изучение показало, что аутигенные минералы представлены округлыми индивидами гипса, почковидными выделениями и сложными агрегатами силикатов марганца, отвечающих формуле йохансенита  $(\text{Mn}_{0,57-0,82}\text{Ca}_{0,16-0,17}\text{Mg}_{0,04-0,42})[\text{Si}_{1,74-2,03}\text{O}_6]$  и каноита  $\text{Mn}_{0,66-1,08}(\text{Mg,Ca})_{0,11-0,48}[\text{Si}_{1,76-2,11}\text{O}_6]$ , и кристаллами, сростками и сложными агрегатами кальцита, на поверхности которого отмечены микровыделения повеллита  $(\text{Ca}_{0,71}\text{Mg}_{0,12})[\text{Mo}_{1,17}\text{O}_4]$ , ванадинита  $\text{Pb}_{4,55-5,12}[(\text{V}_{2,44-3,16},\text{P}_{0-0,63})\text{O}_{12}]\text{Cl}_{0-1,66}$ , пирита, примазки гидроксидов железа и марганца, кремнистые пленки, барит и целестин. Последние характеризуются относительно чистым составом: до 0,1 ат.% бария в целестине и до 1,62 ат.% стронция в барите.

Таким образом, пространственное распределение, морфология агрегатов и химический состав железомарганцевой минерализации позволили выявить три тренда, отражающих уменьшение подвижности формирующихся фаз и увеличение степени гидролизного разложения коллоидных растворов от железо-кремнистых и марганцево-кремнистых к существенно гидроксидным (железистым и марганцевым). Появление повеллита, ванадинита и касситерита отражает условия жаркого (и влажного) климата и значительную сте-

пень окисления, что обеспечило подвижность молибдена и ванадия [Бетехтин, 1950]. Образование самородных фаз, пирита и сфалерита, а также присутствие гипса, органических пленок и железомарганцевых гидроксидов позволяет предполагать проявление трех различных механизмов: сульфат-редукции, восстановление с участием углеродистого материала и редокс-обмена между  $Fe^{3+}$  (твердое) и  $Mn^{2+}$  (раствор), при котором марганец постепенно вытесняет железо из первичного субстрата. Последний механизм предложен для зон эпигенетического марганцевого минералообразования [Силаев, 2008]. Незначительная изоморфная примесь в составе новообразованных кальцита, доломита, барита и целестина, а также присутствие флюорита, гидроксидной железистой и марганцевой минерализации отражает их формирование в условиях низких температур, за счет гипергенной перегруппировки элементов исходной пелитоморфной карбонатной породы.

*Изотопная характеристика.* Изучение изотопного состава углерода и кислорода доломита коры выветривания показало, что в отличие от первичного субстрата он характеризуется более тяжелым составом углерода ( $4,4 \div 10,8\%$ ) и легким кислорода ( $-13,5 \div -8,4\%$ ) (в новообразованном кальците эти показатели составляют  $-9,2 \div 2,0\%$  и  $-11,4 \div -9,4\%$  соответственно) (см. рис. 3). Наблюдаемое утяжеление углерода в остаточном доломите может являться результатом перераспределения изотопов углерода при гипергенном выщелачивании исходного известковистого доломита: фильтрующиеся через карбонатный массив воды выносили более подвижный  $^{12}C$ , а в остаточных карбонатах накапливался менее подвижный  $^{13}C$ . Низкие значения  $\delta^{18}O$  во вторичном доломите могут свидетельствовать о метеорном происхождении фильтрующихся вод. Взаимоотношение между доломитом и кальцитом свидетельствует о наличии временного перерыва между их отложением, что не позволяет рассматривать их как продукты одного (минералообразующего) события или этапа. Данные выводы позволяют говорить, что формирование коры выветривания по первично-осадочным доломитам происходило неоднократно при фильтрации атмосферных вод с низким содержанием  $^{12}C$ . Это условие могло реализоваться в условиях семиаридного климата, когда присутствовали атмосферные осадки, но жизнедеятельность, а, следовательно, количество растворенной биогенной углекислоты, были ограничены.

### **3.3. Гипергенез смешанных сульфатно-карбонатно-глинистых пород**

*Соликамская свита платформенной части Пермского Прикамья (разрез «Чусовская стрелка»).* Исследование глинисто-сульфатно-карбонатной породы показало, что в крайних частях желваков гипса нередко отмечаются почкообразные агрегаты новообразованного метакристаллического кварца с пойкилитовой (ситовидной) структурой и кристалломорфными очертаниями. Их внутреннее строение определяется ориентированными пластинчатыми вростками гипса. На поверхности пойкилокристаллов зафиксированы кальцит, гипс, пирит, оксидное и самородное железо, оксиды марганца, барит и целестин. Предполагается, что растворение гипса в зоне гипергенеза увеличило агрессивность растворов и последующее выщелачивание кальцита, что привело к увеличению щелочности и обогащению растворов кремнием. Растворенный кремнезем осаждался по периферии гипсовых желваков, служащих геохимическим барьером. Пойкилитовое строение образовавшихся метакристаллов кварца, обусловленное ориентированными пластинками гипса, отражает их совместный рост по хаотически ориентированным зернам гипсового желвака. Затем центральная часть желваков выщелачивалась и на кристаллах кварца сформировались индивиды кальцита, маркируя очередное подщелачивание подземных вод.

Схожие образования были отмечены в надсолевой толще Верхнекамского месторождения солей, где гипс-кварц-кальцитовые частичные псевдоморфозы локализованы исключительно среди мергелей соликамской свиты. Предполагается, что их образование произошло при неотектоническом подъеме территории [Чайковский, Чиркова, 2011].

Соликамская свита Соликамской впадины (надсолевая толща Половодовского участка Верхнекамского месторождения). Изучение разреза скважин 704/1, 704/2, вскрывших над локальным поднятием соляной залежи зону гипергенного изменения надсолевых пород, показало, что наряду с интенсивной трещиноватостью (до глыбово-щебневого и древесяно-щебневого материала) глинистые известняки и мергели в районе исследуемых скважин преобразованы в глинистые мергели и глины. Кроме того, здесь выявлены брекчии, образование которых связывается с уменьшением объема пород в результате выщелачивания извести, обрушения и проседания.

Среди выщелоченных пород выделены четыре типа образований. Первые представлены кавернозными карбонатными породами (известняки, глинистые известняки), сформировавшимися за счет избирательного растворения желваков ангидрита. Во вторых процессах декарбонатизации охвачены зоны, примыкающие к послойным и субвертикальным трещинам. Третьи сложены мергелем и глинистым мергелем с заливообразными обособлениями реликтового глинистого известняка. Четвертые характеризуются ячеисто-кавернозным строением, обусловленным вертикальными и послойными кальцитовыми перегородками, между которыми иногда сохраняется несвязанный глинистый материал. Локальный химический анализ первичных и измененных участков второго, третьего и четвертого типа выщелоченных пород позволил установить вынос до 55% карбоната кальция, реже – магния (рис. 8а).

Зоны карбонатизации проявлены в виде колец Лизеганга, рисунок которых определяется системой трещин. Исследование химического состава показало, что осветление пород обусловлено их обогащенностью кальцитом, реже – доломитом, появление которых связывается с диффузионным метасоматозом (рис. 8б). Отмечено, что выщелачивание может накладываться на породы ранее подверженные карбонатизации, что говорит о «смещении» этих процессов вниз по разрезу.

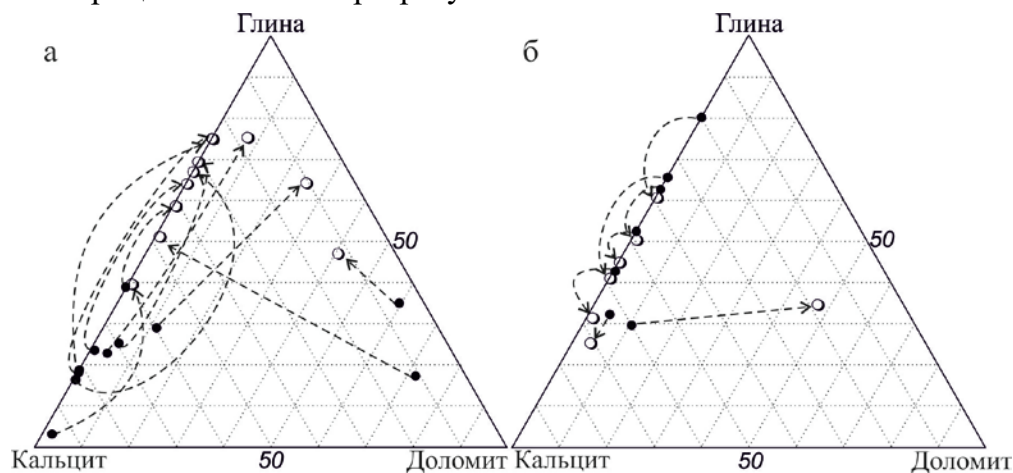


Рис. 8. Соотношение кальцита, доломита и глины в первичных и измененных участках пород зон выщелачивания (а) и карбонатизации (б). Обозначения: закрашенный кружок – первичный состав, незакрашенный – измененный

Соликамская свита Соликамской впадины (надсолевая толща Быгельско-Троицкого участка Верхнекамского месторождения). Брекчиевые породы в кровле соляной залежи Верхнекамского месторождения сложены линзообразными, нередко будинированными обломками и прослоями гипса и округлыми, реже угловатыми обломками доломита с шлейфом дезинтегрированного карбонатного материала. Внутри и на поверхности обломков доломита отмечаются прожилки селенита. Вмещающая масса имеет неоднородный состав, обусловленный неравномерным распределением карбонатно-глинистого материала. Вблизи гипсовых обособлений она насыщена линзовидными ксенолитами гипса, а внутри последних присутствует лишь в качестве тонких «секущих» прожилков. На удалении от них, близ плоскостей скольжения она характеризуется сланцеватой текстурой. Локальный химический состав различных участков породы показал, что глинисто-карбонатное вещество

внутри гипсовых обособлений содержит большее количество карбонатного материала, чем вмещающая масса, локализованная вдоль плоскостей скольжения (рис. 9).

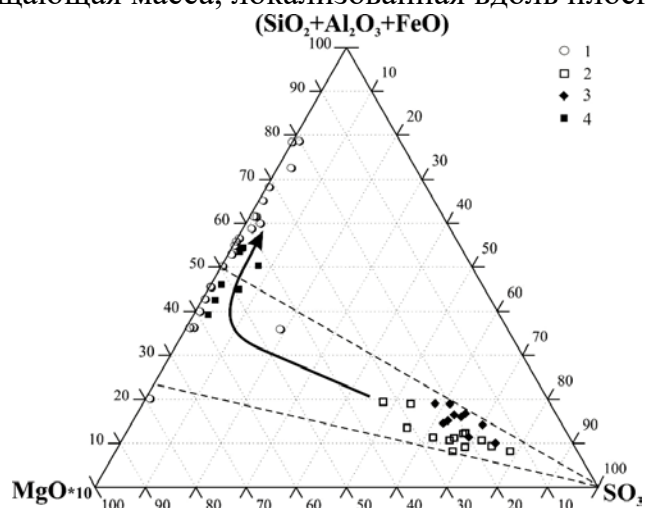


Рис. 9. Вариации химического состава изученной брекчии (мас. %): 1 – локальные мономинеральные глинистые участки; 2-4 – гипсовые обособления (2 – центральная часть; 3 – краевая; 4 – вмещающая масса); 5 – граница предполагаемой зоны изменения состава карбонатно-глинистого вещества при выщелачивании гипса. Стрелкой показана эволюция состава породы

Такое строение брекчий позволяет предполагать их образование за счет расланцевания контактовой зоны между солями и вышележащими породами по системе диагональных плоскостей скольжения. Последнее, вероятно, связано со скольжением надсолевой толщи по соли вдоль конседиментационного сброса. Циркуляция подземных вод вдоль ослабленных зон во время проявления тектонических движений обусловила существенное преобразование вещественного состава брекчиевых пород, проявившегося в выщелачивании сульфатного и карбонатного материала и накоплении глинистого вещества вдоль плоскостей скольжения.

Таким образом, специфика зрелого гипергенеза эвапоритовых толщ определяется составом субстрата, а основными процессами являются растворение и выщелачивание. Конечным продуктом выветривания сульфатов является гипсовая мука, карбонатов – каркасно-ящичная доломитовая порода и известковая мука, а смешанных сульфатно-карбонатно-глинистых пород – существенно глинистые образования с брекчиевой текстурой. Разрушение эвапоритов приводит к высвобождению акцессорных элементов и формированию как в окислительных, так и восстановительных условиях скоплений оксидов, гидроксидов, фосфатов, ванадатов, молибдатов, сульфатов, сульфидов, самородных фаз, флюорита. Изотопия С и О карбонатов отражает тот факт, что формирование коры выветривания по первично-осадочным доломитам нижнепермских эвапоритов происходило неоднократно и в условиях семиаридного климата.

### Заключение

Приведенный в работе материал позволил показать сложную и продолжительную эволюцию карбонатных и сульфатных эвапоритов Пермского Прикамья, которые в связи с легкой растворимостью и деформируемостью чутко реагируют на изменение условий окружающей среды, претерпевая значительные структурно-вещественные преобразования. Резюмируя полученные результаты можно сделать следующие основные выводы.

1. В течение филипповско-иренского времени на территории Пермского Прикамья существовал обширный мелководный периодически опресняющийся бассейн, где происходило накопление карбонатных и сульфатных толщ. Соликамские эвапориты сформировались в начальный период последнего трансгрессивного цикла раннепермского моря, когда шло постепенное распреснение реликтовой кунгурской лагуны. Текстура сульфатов формируется на стадии седиментации и диагенеза и зависит от содержания несульфатного материала в породе и анизотропии минералообразующей среды.

2. Сопоставление изученных разрезов с другими эталонами древних и современных эвапоритов показало, что они представлены многократно повторяющимися полными, выдержанными циклами (пелитоморфный/оолитовый доломит → шевронный → массивный

→ желваковый → линзовидно-желваковый ангидрит), отражающими закономерную эволюцию концентрации вод бассейна, что позволяет считать нижнепермские эвапориты Пермского Прикамья эталоном эвапоритовой карбонатно-сульфатной седиментации.

3. Микроэлементы карбонатных и сульфатных эвапоритов связаны, главным образом, с глинистой фракцией. В процессе гидратации ангидрита и последующей перекристаллизации гипса происходит перераспределение элементов как в самих сульфатных пачках, так и смежных с ними карбонатных, сопровождающееся образованием новых минеральных фаз.

4. Карбонатные и сульфатные эвапориты Пермского Прикамья характеризуются видовой бедностью первичных минералов (гипс, ангидрит, доломит, селадонит, говлит) и большим разнообразием продуктов начального (пробертит, студеницит, флюорит, целестин, сидерит и др.) и зрелого (гидроксиды марганца и железа, флюорит, мирабилит, блёдит, улесит, цинксодержащий сапонит, барит, пирит, касситерит, тенорит, самородное золото, медистое серебро, цинк, железо, олово, латунь, ванадинит, повелит) гипергенного изменения.

5. Гипергенез сульфатных толщ приводит к образованию площадных и линейных кор, где основным процессом разрушения гипсов является физическое и в меньшей мере физико-химическое выветривание. Гипергенез карбонатных толщ приводит к образованию коры, сложенной каркасно-ящичной, кавернозной доломитовой и кальцит-доломитовой породой, характеризующейся минералого-геохимической зональностью. При выветривании смешанных сульфатно-карбонатно-глинистых пород происходит выщелачивание сульфатной, а затем карбонатной (сначала известковистой, а затем доломитовой) составляющей с накоплением существенно глинистого остатка. При этом происходит уменьшение объема пород с образованием брекчий и проявление локальной карбонатизации в виде колец Лизеганга. Наложение тектонических процессов приводит к интенсификации процессов гипергенеза эвапоритов с формированием линейных кор выветривания и брекчиевых пород.

### **Список публикаций автора по теме диссертационной работы**

#### **В научных рецензируемых журналах и изданиях, определенных ВАК**

1. Чайковский И.И. Структурно-вещественная модель Верхнекамского месторождения как основа его безопасного освоения / Чайковский И.И., Чиркова Е.П., Каблинов О.С., Калинина Т.А. // Горный журнал. 2013. № 6 (2189). С. 8-11.

2. Калинина Т.А. О природе брекчиевых пород в кровле соляной залежи Верхнекамского месторождения / Т.А. Калинина, И.И. Чайковский // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 5. С. 424-431.

3. Калинина Т.А. Литогеохимия кунгурских эвапоритов западного борта Юрюзано-Сылвенской впадины / Т.А. Калинина, И.И. Чайковский // Литосфера. 2015. № 2. С. 65-80.

#### **В научных журналах и сборниках научных трудов конференций**

4. Калинина Т.А. Структурно-минералогические особенности пород Шубинского месторождения гипса // Пермская система: стратиграфия, палеонтология, палеогеография, геодинамика и минеральные ресурсы: сб. матер. науч. конф. Пермь: ПГУ, 2011. С. 260-263.

5. Kalinina T. The structural, textural and mineralogical rock characteristics in the Kungur Ice Cave and their transformation at karstification / Scientific research in show caves: abstracts. Skocjan-Borgo Grotta Gigante (Словения-Италия), 2012. P. 28.

6. Калинина Т.А. Минералогия гипергенеза сульфатноносных пород Чусовской стрелки // Кристаллическое и твердое некристаллическое состояние минерального вещества: проблемы структурирования, упорядочения и эволюции структуры: матер. минералог. семинара с международным участием. Сыктывкар, 2012. С. 250-251.

7. Калинина Т.А. Минералогия коры выветривания на Шубинском месторождении / Т.А. Калинина, И.И. Чайковский // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст. Пермь: ПГУ, 2012. Вып. 15. С. 106-114.

8. **Калинина Т.А.** Текстурно-структурная характеристика сульфатных отложений Пермского Прикамья // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Пермь: ГИ УрО РАН, 2012. Вып. 10. С. 10-12.
9. **Калинина Т.А.** Структурно-текстурная и минералогическая характеристика пород Кунгурской Ледяной пещеры // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст. Пермь: ПГУ, 2013. Вып. 16. С. 201-208.
10. **Калинина Т.А.** О природе брекчии в кровле соляного зеркала Троицко-Быгельского участка Верхнекамского месторождения // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Пермь: ГИ УрО РАН, 2013. Вып. 11. С. 8-9.
11. **Калинина Т.А.** Структурные особенности гипсовых пород пещеры Подарок (Оренбургская область) / Т.А. Калинина, О.И. Кадебская // Уральская минералогическая школа-2013: сб. статей Всерос. молодеж. науч. конф-и. Екатеринбург, 2013. С. 56-58.
12. **Калинина Т.А.** Гипергенные процессы в эвапоритовых толщах Прикамья // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геол-й истории: мат-лы VII Всерос. литол. сов-я. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. Т. I. С. 411-414.
13. **Калинина Т.А.** Изотопный состав карбонатов Верхнекамского месторождения / Т.А. Калинина, Е.П. Чиркова, И.И. Чайковский // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст. Пермь: ПГУ, 2014. Вып. 17. С. 201-208.
14. **Калинина Т.А.** Специфика гипергенного преобразования надсолевого разреза в при-сводовой части Харюшинского поднятия Верхнекамского месторождения солей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Пермь: ГИ УрО РАН, 2014. Вып. 12. С. 16-17.
15. **Кадебская О.И.** Литологический разрез Ледяной горы / О.И. Кадебская, **Т.А. Калинина** // Комплексное использование и охрана подземных пространств: междунар. науч.-практ. конф. / ГИ УрО РАН. Пермь, 2014. С.42-49.
16. **Калинина Т.А.** Минералогия коры выветривания гипсовых пород в долине р. Судинки / Т.А. Калинина, Н.В. Лаврова // Уральская минералогическая школа-2014: мат-лы XX Всерос. науч. конф-и. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2014. С. 95-100.
17. **Калинина Т.А.** Изотопный состав эвапоритов Пермского Прикамья и продуктов их выветривания // Виртуальные и реальные литологические модели: мат-лы Всерос. школы студ., асп-в и мол. уч. по литологии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2014. С. 67-69.
18. **Калинина Т.А.** Борные минералы в эвапоритах Пермского и Башкирского Приуралья / Т.А. Калинина, О.И. Кадебская, И.И. Чайковский, Н.Р. Галимов, А.Е. Гришин // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст. Пермь: ПГНИУ, 2015. Вып. 18. С. 119-126.
19. **Калинина Т.А.** Последовательность гидратации и перекристаллизации ангидритсодержащих пород района «классического» кунгура // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. Вып. 13. С. 12-15
20. **Сонин Г.В.** Стеночные строматолиты соликамского горизонта Пермского Приуралья и их происхождение / Г.В. Сонин, **Т.А. Калинина**, Ю.Н. Осин, В.В. Воробьев // Современные концепции научных исследований: мат-лы XII Междунар. конф-и. Москва, 2015. С.141-147.
21. **Кадебская О.И.** Изотопия и морфология новообразованных карбонатов из карбонатно-сульфатного массива Ледяной горы / О.И. Кадебская, **Т.А. Калинина**, И.И. Чайковский // Вестник Пермского университета. Геология. 2015. № 2 (27). С. 6-16.
22. **Калинина Т.А.** Литохимия пелитоморфных пород соликамской свиты Верхнекамского месторождения солей / Т.А. Калинина, И.И. Чайковский // Горное эхо. 2015. № 1 (58). С. 28-32.

Сдано в печать 5 октября 2015 г.

Формат 60x84/16. Тираж 150 экз.

Отпечатано сектором НТИ

ГИ УрО РАН

614007, г. Пермь ул. Сибирская, д. 78-а