УДК 552.542:552.52

# ЛИТОХИМИЧЕСКАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ СОЛИКАМСКОЙ СВИТЫ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ (НИЖНЯЯ ПЕРМЬ, ПЕРМСКИЙ КРАЙ)

© 2025 г. Т. А. Уткина<sup>*a*, \*</sup>, И. И. Чайковский<sup>*a*, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Горный институт УрО РАН, ул. Сибирская, 78-А, Пермь, 614007 Россия

\*e-mail: tatyanaak89@mail.ru \*\*e-mail: ilya@mi-perm.ru Поступила в редакцию 25.06.2024 г. После доработки 05.08.2024 г. Принята к публикации 15.11.2024 г.

Приведены новые данные по литохимии глинисто-карбонатных пород соликамской свиты (уфимский ярус нижнего отдела перми) в юго-западной части Соликамской впадины Предуральского краевого прогиба. Показано, что цикличность осадконакопления определялась привносом в эвапоритовый, а затем и морской бассейн алюмосиликатного материала с прилежащей суши. По вариациям содержания терригенного вещества, в строении соликамской толщи выделено девять циклитов, в которых доля глинистых минералов в породе сначала постепенно увеличивается, а затем относительно уменьшается. Часть сульфатных прослоев не связана с выделенной цикличностью, что обусловлено их формированием за счет диагенетического роста ангидритовых желваков на зеркале грунтовых вод во время периодического усыхания бассейна. Анализ химического состава терригенной составляющей пород соликамской свиты позволил показать, что в начале соликамского времени в бассейн приносились продукты разрушения пород основного состава (точки состава приурочены к полю "хлориты, смектиты и иллиты" на диаграмме ФМ-НКМ), а в конце – среднего и кислого (уменьшение значений ГМ и ЩМ вверх по разрезу, смещение фигуративных точек мергелей в поле "преимущественно иллитовых глин со значительным количеством калиевых полевых шпатов" на диаграмме ФМ-НКМ). О различной степени литохимической зрелости поступаемого терригенного материала свидетельствуют вариации индексов CIA, CIW и ICV.

*Ключевые слова:* литохимическая цикличность, мергели, стратификация и корреляция эвапоритов, уфимский ярус, Верхнекамское месторождение солей

DOI: 10.31857/S0024497X25020052, EDN: CHKNIF

Породы соликамской свиты, залегающие на соляной залежи Верхнекамского месторождения, маркируют начало крупного трансгрессивного цикла, вызвавшего постепенное опреснение кунгурской лагуны Соликамской впадины Предуральского краевого прогиба. Несмотря на почти 100-летнюю историю изучения, остаются проблемы литостратиграфического подразделения и корреляции этих отложений, что обусловлено их однообразным внешним видом (серый цвет пород и пелитоморфная структура), а также скудностью видового разнообразия биоты. Кроме того, к настоящему времени довольно слабо освещены проблемы литохимического состава соликамских отложений, решение которых могло бы способствовать реконструкции тектонических и климатических обстановок их формирования,

установить источники сноса обломочного материала в соликамский бассейн.

Вопрос о возможном проявлении цикличности в соликамской свите не раз ставился различными авторами, которые для поиска ее признаков использовали палеонтологические методы, анализ распределения по разрезу рассеянных элементов, битумов и спорово-пыльцевых комплексов [Иванов, Воронова, 1975], данные гамма-каротажа [Третьяков, Сапегин, 1981], а также анализ разрезов скважин и их корреляцию на всей территории Верхнекамского месторождения солей [Трапезников, 2019]. Изучение макрои микроэлементного состава пород соликамской свиты [Калинина, Чайковский, 2015; Калинина и др., 2016; Чайковский, Бубнова, 2021] позволило выявить циклические вариации содержания основных породообразующих компонентов (глина, кальцит, доломит), и показать тесную геохимическую связь силикатной составляющей глинисто-карбонатных пород с разрушающимся массивом Уральского орогена.

Анализ зарубежной и отечественной литературы показывает, что при исследовании биостратиграфически "немых" глинисто-карбонатных пород в последние годы широкое применение находят разнообразные лито- и геохимические методы [Knudsen, Lauridsen, 2016; Liang et al., 2017; Naujokaitytė et al., 2021; Nohl et al., 2021; Jenkyns, Macfarlane, 2022; Lei et al., 2022; Yasukawa et al., 2023; Macлob, 2024]. Их использование дает возможность выявить признаки стратификации в таких осадочных толщах и реконструировать палеотектонические и палеоклиматические обстановки ее формирования.

# ХАРАКТЕРИСТИКА ЭВАПОРИТОВОЙ ОСАДОЧНОЙ АССОЦИАЦИИ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ

Соликамская впадина расположена в центральной части Предуральского краевого прогиба и ограничивается с юга Косьвинско-Чусовской, а с севера – Ксенофонтово-Колвенской седловинами [Кудряшов, 2013] (рис. 1). Основная часть разреза впадины представлена эвапоритовым комплексом пород, который в стратиграфическом отношении относится к филлиповскому и иренскому горизонтам кунгурского яруса, а также соликамскому горизонту уфимского яруса пермской системы. В соответствии с существующими реконструкциями для конца приуральской (ранней) эпохи [Игнатьев, 1976; Копнин, 1991; Оборин, Хурсик, 1973; Мизенс, 1997], в развитии раннепермского Соликамского солеродного бассейна выделяется два этапа. На первом (кунгурский век) он представлял собой глубоководный бассейн, который с востока был ограничен Уральским орогеном, а с запада – мелководным солоноватоводным и солоноводным, периодически опресняющимся эпиконтинентальным морем с сульфатно-карбонатным осалконакоплением. К концу кунгурского века солеродный бассейн сохранился лишь в пределах Соликамской впадины, где осолонение вод достигло уровня садки хлоридных солей Верхнекамского месторождения. На втором этапе (соликамское время уфимского века) наступление моря с севера [Игнатьев, 1976] привело к опреснению кунгурской лагуны и постепенной ингрессии моря на восточную часть Восточно-Европейской платформы.



**Рис. 1.** Положение Соликамской впадины в строении Предуральского краевого прогиба.

1 — впадины; 2 — седловины; 3 — контур соляной залежи Верхнекамского месторождения солей; 4 — геологические границы (*a* — толщ; *б* — тектонических элементов) (по [Кудряшов, 2013]).

Соликамская свита соликамского горизонта уфимского яруса подразделяется на две подсвиты: нижне- и верхнесоликамскую. Согласно реконструкциям соликамского времени [Трапезников, 2019], отложения нижнесоликамской подсвиты Соликамской впадины, представленные мергелями, глинистыми породами, ангидритами и каменной солью, формировались в периодически пересыхающем лагунно-морском бассейне в течение тринадцати эвапоритовых циклов, тогда как накопление осадков верхнесоликамской подсвиты (мергели, доломиты, известняки, песчаники и алевролиты) происходило в течение семи трансгрессивно-регрессивных циклов в морском бассейне.

# МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления литохимических изменений в разрезах соликамской свиты были отобраны образцы глинисто-карбонатных пород с шагом 0.2–0.25 м из керна скв. 2010 и 2211, расположенных в юго-западной части Верхнекамского месторождения солей (см. рис. 1).

Валовый химический анализ пород (скв. 2010 — 580 проб; скв. 2211 – 370 проб) выполнен в лаборатории геологии месторождений полезных ископаемых Горного института УрО РАН (г. Пермь) с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350/Х-тах 20 (операторы Е.П. Чиркова, О.В. Коротченкова). Наряду с точечными анализами он позволяет определять валовой состав на определенной площади образца. Для исследованных пелитоморфных пород сканирование проводилось на площади 5 × 5 мм; режим – BSE (backscattered electrons, отраженные электроны); фокусное расстояние — 15 мм; ускоряющее напряжение – 20 кВ.

При пересчете данных химического анализа на минеральный фазовый состав породы использовалась методика, разработанная М.Г. Валяшко [1939] и описанная Ю.В. Мораческим и Е.М. Петровой [Методы ..., 1965], в основе которой лежит последовательность выделения солей при концентрировании морской воды. Предыдущими исследователями [Иванов, Воронова, 1975; Кудряшов, 2013] показано, что основными породообразующими компонентами пород соликамской свиты являются галит, сульфаты (гипс, ангидрит), карбонаты (кальцит, доломит), а также глинистый материал. Поэтому при пересчете данных анализа последовательность вычислений проводилась следующим образом: галит – гипс – доломит – кальцит – глина (иллит).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### Макрокомпонентный и нормативный состав

Исследование химического состава пород из обеих скважин показало их близкий макроэлементный состав (табл. 1), где основными породообразующими компонентами являются SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SO<sub>3</sub> (на их долю приходится более 85 мас. %), а второстепенными – Cl, Na<sub>2</sub>O,  $K_2O$ , TiO<sub>2</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3общ</sub>. Особенности распределения этих компонентов по разрезу позволили выявить две ассоциации: Cl–Na<sub>2</sub>O (r = 0.84-0.99) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3общ</sub> (r = 0.52-0.95), и показать достаточно автономное поведение  $SO_3$ , CaO и MgO, причем последние два оксида характеризуются отрицательной корреляцией с компонентами второй ассоциации (*r* варьируется от -0.25 до -0.88). Предполагается, что первая группа связана с мигрирующими рассолами подстилающей кунгурской соляной толщи и отражает состав поровых вод [Мигунов, 1994; Кудряшов, 2013], тогда как компоненты второй ассоциации – это составляющие глинистой части мергелей. Независимое

свиты, мас. %	

	Na <sub>2</sub> O	MgO	$Al_2O_3$	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3общ</sub>
Скважина 2211 ( <i>n</i> = 370)										
Среднее	4.10	12.31	7.98	30.70	5.02	2.43	1.41	32.21	0.21	3.63
Минимум	0	0	0.36	5.59	0.96	0	0	1.42	0	0
Максимум	39.86	47.16	15.98	85.45	54.31	39.04	4.75	82.92	2.49	9.67
Скважина 2010 ( <i>n</i> = 580)										
Среднее	1.94	10.93	10.35	35.86	5.37	0.61	2.09	28.04	0.40	4.41
Минимум	0	1.03	0.76	3.09	0	0	0	1.31	0	0.50
Максимум	12.88	32.20	19.85	59.27	54.07	9.86	6.03	89.63	3.73	8.57

Скважина	Глина	Кальцит	Доломит	Гипс*
2211 ( <i>n</i> = 370)	$\frac{44.01 \pm 0.90}{6.64 - 87.49}$	$\frac{18.61 \pm 0.99}{0 - 79.70}$	$\frac{29.69 \pm 1.10}{0 - 84.55}$	$\frac{7.63 \pm 0.59}{0.68 - 81.77}$
2010 ( <i>n</i> = 580)	$\frac{49.98 \pm 0.80}{3.99 - 96.96}$	$\frac{15.71 \pm 0.65}{0 - 88.45}$	$\frac{29.29 \pm 0.82}{0 - 81.82}$	$\frac{7.94 \pm 0.35}{0 - 89.81}$

**Таблица 2.** Среднее арифметическое, минимальное и максимальное содержание компонентов в породах соликамской свиты, г/т

Примечание. \* – безводный состав.

поведение SO<sub>3</sub>, CaO и MgO, а также их отрицательная связь с оксидами второй ассоциации обусловлены особенностями осадконакопления в соликамском бассейне: чередованием сульфатной и карбонатной (кальцитовой и доломитовой) седиментации на фоне периодического привноса терригенного материала с прилегающей суши [Трапезников, 2019].

Данные валового химического состава были пересчитаны на пять нормативных фаз с составами глины (иллита), кальцита, доломита, гипса и галита (табл. 2). Как отмечено выше, появление галита в составе пород соликамской свиты связано не столько с процессами осадконакопления, как с постседиментационной миграцией солевых рассолов, поэтому при реконструкциях вариации его содержания нами не учитывались. Анализ полученных данных показал, что содержание приведенных минеральных фаз сильно варьируется по разрезам обеих скважин (рис. 2, 3).

Корреляционная связь между содержанием глины и карбонатов (доломит + кальцит) в обеих скважинах в целом сильная отрицательная (в скв. 2211 и 2010 значения *r* составляют соответственно -0.82 и -0.91), тогда как для пар "глинадоломит" и "глина-кальцит" связь более слабая (в скв. 2211 значения *r* составляют -0.51 и -0.29; а в скв. 2010 – соответственно –0.64 и –0.38). Более сложные взаимоотношения наблюдаются в парах "глина-гипс" и "карбонаты-гипс". Так, если связь гипса с глиной практически отсутствует в обеих скважинах (в скв. 2211 и 2010 значения *r* составляют -0.10 и -0.12 соответственно), то между гипсом и карбонатами связь слабая отрицательная: значения r = -0.49 в скв. 2211 и r = -0.30 в скв. 2010. Полученные данные позволяют говорить как о преимущественной роли колебаний содержания глинистого и карбонатного вещества в вариациях общего состава пород соликамской свиты, так и о вероятном проявлении нескольких механизмов накопления карбонатов. Повышенное содержание нормативного гипса в отдельных интервалах разреза, не согласующееся с выявленной цикличностью, может объясняться не седиментационным образованием, а диагенетической природой ангидритовых желваков, формировавшихся на зеркале грунтовых вод во время периодических усыханий бассейна, а не в периоды сульфатной садки [Калинина, 2012].

Анализ распределения содержания глины по разрезу позволил выделить шесть циклитов в разрезе скв. 2010 и семь – в скв. 2211 (см. рис. 2, 3), в пределах которых доля глинистых минералов в породе сначала постепенно увеличивается, а затем относительно резко уменьшается. При этом для карбонатов (доломит + кальцит) характерно обратное распределение. Близкий характер изменений содержания глины в четвертом-шестом циклитах скв. 2010 и в первом-третьем циклитах скв. 2211 позволяет считать их циклитами одного и того же времени проявления. Увеличение содержания гипса в направлении кровли циклита отмечено в первом, втором и пятом (скв. 2211) циклитах, а во всех остальных не является закономерным.

Для выявления особенностей осадконакопления в соликамское время, данные о содержании основных составляющих глинисто-карбонатных пород (карбонат, доломит, глина в пересчете на нормативные составы) были нанесены на классификационную диаграмму С.Г. Вишнякова [1933] (рис. 4а, 5а), крайние точки которой отражают проявление процессов эвапоритизации (доломит), привноса терригенного материала континентальными водами (глина) и трансгрессии моря (кальцит). Характер распределения точек позволил выявить две основные области состава пород, определяемых вариациями соотношений "глина-доломит" и "глина-кальцит". Нанесенные фигуративные точки были соединены друг с другом в последовательности, отражающей их положение в разрезе, т.е. от ранних к поздним (см. рис. 4б, 5б). Полученные линии (векторы, последовательности) позволили показать характер (эволюционную направленность) изменения состава породы, а также выявить преобладающий фактор (континентальный снос, эвапоритизация,



Скважина 2211



**Рис. 2.** Вариации содержания породообразующих минералов соликамской свиты по разрезу скв. 2211 и 2010. Римскими цифрами обозначен порядковый номер циклита.



Рис. 3. Сопоставление разрезов скв. 2211 и 2010. 1 – мергели; 2 – известняки глинистые; 3 – доломиты глинистые; 4 – гипсы. Римскими цифрами обозначен порядковый номер циклита.

трансгрессия моря) в период накопления осадка (см. рис. 4в, 5в).

Характер распределения точек состава мергелей <u>первого циклита</u> контролируется парой "глина–доломит" (более 90% последовательностей;  $r_{елина-доломит} = -0.93$ ). Среднее содержание доломита в породах циклита составляет 30.86 мас. %, глины – 57.34 мас. %, кальцита – 2.76 мас. %. Это позволяет говорить о том, что в начале соликамского времени цикличность осадконакопления определялась преимущественно процессами привноса в эвапоритовый бассейн глинистого вещества континентальными водами.





а – соотношение глины, кальцита и доломита в мергеле; б – соединение точек состава пород линиями (векторами) в последовательности, отражающей их положение в разрезе (от ранних к поздним); в – преобладающие факторы, определяющие осадконакопление в период формирования циклита (цифрами показана доля векторов (последовательностей) в процентах). Римскими цифрами обозначен порядковый номер циклита.

(б) (B) (a) VI кальцит (100%) оломит (100%) IV III Π n = 109T

глина (100%)

Рис. 5. Эволюция состава соликамских глинисто-карбонатных пород в разрезе скв. 2010. Условные обозначения см. рис. 4.

Близкий характер распределения точек состава глинисто-карбонатных пород отмечается и для второго циклита – 59% от всех наблюдаемых последовательностей определяется соотношением "глина–доломит" ( $r_{елина-доломит} = -0.64$ ). Появление пары "кальцит–глина" (до 14% всех связей), а также увеличение содержания кальцита в породах циклита (до 37.83 мас. %) связывается с поступлением морских вод в бассейн. Для <u>третьего циклита</u> основной контролирующей состав породы парой остается соотношение глины и доломита в породе – 80% от всех векторов в скв. 2211 ( $r_{2лина-доломит} = -0.56$ ) и 54% – в скв. 2010 ( $r_{2лина-доломит} = -0.78$ ). Однако увеличение содержания кальцита (до 43.5–47.99 мас. %) и появление второстепенного тренда (12%), определяемого сменой доломита кальцит-глинистым материалом, свидетельствует о постепенном увеличении роли морских вод в соликамском бассейне.

Для четвертого и пятого циклитов характерно двумодальное распределение точек состава глинисто-карбонатных пород: в скв. 2211 на последовательности "глина-доломит" приходится 41-49% соотношений (*r*<sub>глина-доломит</sub> равен -0.40 для четвертого и -0.47 – для пято-го циклитов), а "глина-кальцит" – 30-33% (*r*<sub>елина-кальцит</sub> равен -0.41 и -0.24 соответственно); в скв. 2010 на векторы "глина-доломит" приходится 34% соотношений (*r*<sub>глина-доломит</sub> равен -0.44 для четвертого и -0.55 - для пятого циклитов), а "глина-кальцит" – 25% (*r*<sub>глина-кальцит</sub> равен -0.49 и -0.31 соответственно). Кроме того, появляются различные второстепенные тренды, свидетельствующие как о смене доломитового осадконакопления кальцит-глинистым (11-13% наблюдаемых последовательностей), так и доломит-глинистой - кальцитовой (четвертый циклит: 30% трендов в скв. 2211 и 10% – в скв. 2010). Среднее содержание глины в породах циклитов составляет 42.46-45.99 мас. %, доломита – 24.69–30.02 мас. %, кальцита – 21.02-24.96 мас. %. Такое соотношение указывает на практически равное влияние процессов эвапоритизации и поступления морских вод.

Для пород шестого циклита также наблюдается двумодальное распределение точек состава, однако характер направления векторов указывает на цикличность осадконакопления. В скв. 2211 на соотношение "глина-кальцит" приходится 43% последовательностей (*r*<sub>глина-кальцит</sub> = -0.31), "кальцит-доломит" – 33% ( $r_{\kappa aльцит-доломит} = -0.61$ ), "доломит-глина" -21% ( $r_{2лина-доломит} = -0.55$ ); в скв. 2010 на соотношение "глина-кальцит" приходится 29% векторов (*r*<sub>глина-кальцит</sub> = -0.39), "кальцитдоломит" – 28% (*г<sub>кальцит</sub>-доломит* = –0.51), "доломит– глина" – 14% ( $r_{\text{елина-доломит}} = -0.55$ ). Появление на этом фоне направления "кальцит-глина" (16% от всех соотношений в скв. 2010) свидетельствует о том, что седиментационные последовательности нередко контролировались только поступлением морских и континентальных вод в палеобассейн, а роль испарения была незначительна.

Для седьмого и восьмого циклитов вновь отмечается двумодальное распределение точек состава глинисто-карбонатных пород, но, несмотря на это, в седьмом циклите основной определяющей парой является соотношение "глина–доломит" – 56% всех последовательностей ( $r_{2лина-доломит} = -0.82$ ), а в восьмом – "глина–кальцит" (75% от всех соотношений ( $r_{2лина-кальцит} = -0.44$ ). На изменение преобладающего направления указывает и изменение состава карбонатов в породах седьмого и восьмого циклитов: так среднее содержание кальцита увеличивается с 10.67 до 29.03 мас. %, а доломита уменьшается – с 39.79 до 20.68 мас. %.

Породы <u>девятого циклита</u> характеризуются циклическим характером изменения состава: на соотношение "глина–кальцит" приходится 38% векторов ( $r_{2лина-кальцит} = -0.21$ ), "кальцит-доломит" – 18% ( $r_{кальцит-доломит} = -0.70$ ), "глина-доломит" – 30% ( $r_{слина-доломит} = -0.42$ ). Для пород этого циклита характерно уменьшение среднего содержания глинистого материала (до 36.32 мас. %) и увеличение – карбонатов (~59.13 мас. %), что может говорить об уменьшении роли поверхностного стока и усилении роли морского и эвапоритового карбонатонакопления.

Таким образом, приведенный нами анализ последовательностей седиментации в соликамском бассейне позволил подтвердить смену в течение соликамского времени кунгурского эвапоритового бассейна на практически морской, а также показать, что цикличность осадконакопления определялась привносом в эвапоритовый, а затем и морской бассейн глинистого материала с прилежащей суши. Появление сульфатных прослоев связано как с их осадконакоплением, так

**Таблица 3.** Среднее, минимальное и максимальное содержание основных и второстепенных породообразующих оксидов в терригенной части глинисто-карбонатных пород соликамской свиты, мас. %

Циклит	Na <sub>2</sub> O	MgO	$Al_2O_3$	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3общ</sub>		
Скважина 2211									
9	$\frac{2.87 \pm 0.40}{0-26.32}$	$\frac{3.69 \pm 0.18}{2.43 - 10.80}$	$\frac{16.04 \pm 0.38}{7.47 - 21.64}$	$\frac{67.09 \pm 0.65}{49.43 - 80.87}$	$\frac{2.51 \pm 0.15}{0 - 4.71}$	$\frac{0.28 \pm 0.13}{0 - 8.21}$	$\frac{7.51 \pm 0.22}{0-13.34}$		
8	$\frac{3.18 \pm 0.37}{0.62 - 20.35}$	$\frac{3.31 \pm 0.11}{2.52 - 9.47}$	$\frac{17.32 \pm 0.13}{14.70 - 19.93}$	$\frac{64.65 \pm 0.35}{51.24 - 69.75}$	$\frac{3.11 \pm 0.08}{0 - 3.95}$	$\frac{0.40 \pm 0.07}{0 - 2.43}$	$\frac{8.03 \pm 0.16}{6.64 - 12.47}$		
7	$\frac{5.02 \pm 1.17}{0-41.60}$	$\frac{5.54 \pm 1.21}{1.82 - 43.59}$	$\frac{16.35 \pm 0.46}{6.08 - 19.20}$	$\frac{62.81 \pm 1.16}{36.94 - 77.46}$	$\frac{2.75 \pm 0.11}{0 - 3.62}$	$\frac{0.37 \pm 0.08}{0 - 2.08}$	$\frac{7.16 \pm 0.29}{0 - 10.53}$		
6	$\frac{3.22 \pm 0.11}{0 - 6.29}$	$\frac{5.86 \pm 0.90}{2.66 - 51.15}$	$\frac{15.69 \pm 0.34}{6.96 - 20.11}$	$\frac{65.65 \pm 0.67}{41.55 - 78.06}$	$\frac{2.49 \pm 0.12}{0-4.09}$	$\frac{0.24 \pm 0.05}{0 - 1.21}$	$\frac{6.96 \pm 0.26}{0 - 19.56}$		
5	$\frac{7.11 \pm 1.19}{0.22 - 45.49}$	$\frac{4.28 \pm 0.61}{2.03 - 30.64}$	$\frac{15.69 \pm 0.50}{0.40 - 19.60}$	$\frac{62.50 \pm 1.18}{36.83 - 94.72}$	$\frac{2.67 \pm 0.14}{0 - 4.41}$	$\frac{0.35 \pm 0.06}{0 - 1.42}$	$\frac{7.40 \pm 0.28}{0-12.29}$		
4	$\frac{8.18 \pm 0.94}{2.27 - 25.22}$	$\frac{4.03 \pm 0.52}{2.45 - 16.62}$	$\frac{16.51 \pm 0.43}{7.97 - 19.59}$	$\frac{60.10 \pm 1.14}{44.80 - 80.49}$	$\frac{2.78 \pm 0.15}{0 - 4.50}$	$\frac{0.46 \pm 0.08}{0 - 1.38}$	$\frac{7.95 \pm 0.35}{2.96 - 13.45}$		
3	$\frac{5.30 \pm 0.86}{2.02 - 19.62}$	$\frac{5.49 \pm 0.48}{2.71 - 10.44}$	$\frac{17.15 \pm 0.19}{15.26 - 19.98}$	$\frac{58.81 \pm 0.62}{51.43 - 63.87}$	$\frac{3.89 \pm 0.23}{2.34 - 5.82}$	$\frac{0.78 \pm 0.08}{0 - 1.59}$	$\frac{8.58 \pm 0.43}{0 - 12.09}$		
	Скважина 2010								
6	$\frac{2.38 \pm 0.14}{0-4.51}$	$\frac{3.52 \pm 0.18}{3.09 - 9.27}$	$\frac{16.95 \pm 0.35}{9.95 - 22.09}$	$\frac{65.18 \pm 0.62}{52.61 - 77.85}$	$\frac{3.36 \pm 0.08}{1.60 - 4.08}$	$\frac{0.37 \pm 0.09}{0 - 1.92}$	$\frac{8.24 \pm 0.19}{5.37 - 10.65}$		
5	$\frac{2.90 \pm 0.11}{0 - 8.67}$	$\frac{3.36 \pm 0.06}{2.63 - 6.99}$	$\frac{16.10 \pm 0.25}{6.13 - 18.85}$	$\frac{66.06 \pm 0.47}{53.40 - 82.01}$	$\frac{3.08 \pm 0.09}{0 - 4.08}$	$\frac{0.45 \pm 0.06}{0 - 2.29}$	$\frac{8.05 \pm 0.21}{3.84 - 20.23}$		
4	$\frac{2.99 \pm 0.10}{8.97 - 20.90}$	$\frac{3.24 \pm 0.04}{2.79 - 5.74}$	$\frac{17.29 \pm 0.22}{8.97 - 20.90}$	$\frac{64.07 \pm 0.39}{56.65 - 80.04}$	$\frac{3.73 \pm 0.09}{0 - 5.77}$	$\frac{0.51 \pm 0.06}{0 - 1.76}$	$\frac{8.16 \pm 0.16}{3.55 - 12.97}$		
3	$\frac{2.10 \pm 0.05}{0 - 4.22}$	$\frac{3.75 \pm 0.12}{2.83 - 9.67}$	$\frac{18.46 \pm 0.11}{13.17 - 22.41}$	$\frac{63.03 \pm 0.20}{55.03 - 71.83}$	$\frac{3.97 \pm 0.09}{0 - 2.58}$	$\frac{0.62 \pm 0.05}{0 - 2.58}$	$\frac{8.07 \pm 0.15}{0 - 13.78}$		
2	$\frac{2.62 \pm 0.07}{0-7.32}$	$\frac{3.35 \pm 0.13}{2.90 - 15.35}$	$\frac{19.41 \pm 0.08}{16.98 - 21.55}$	$\frac{62.76 \pm 0.16}{52.71 - 65.28}$	$\frac{3.26 \pm 0.07}{0 - 3.96}$	$\frac{0.74 \pm 0.05}{0 - 3.18}$	$\frac{7.87 \pm 0.15}{4.81 - 16.24}$		
1	$\frac{2.93 \pm 0.19}{0 - 12.08}$	$\frac{4.91 \pm 0.28}{2.77 - 20.57}$	$\frac{18.92 \pm 0.12}{15.18 - 21.93}$	$\frac{61.85 \pm 0.26}{48.03 - 66.19}$	$\frac{3.73 \pm 0.09}{2.70 - 6.93}$	$\frac{0.70 \pm 0.09}{0 - 6.33}$	$\frac{6.95 \pm 0.16}{1.35 - 11.41}$		

и диагенетической перегруппировкой вещества в уплотняющемся осадке.

## Литохимические особенности терригенной составляющей соликамской свиты

Для выявления особенностей химического состава терригенной составляющей, а также реконструкции источников сноса обломочного материала, результаты аналитических определений были рассчитаны на бескарбонатный состав. Следовательно, основными компонентами обломочного материала (их среднее содержание превышает 5–6%) являются SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3общ</sub>, а второстепенными – Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> и MgO (табл. 3).

Распределение компонентов по разрезу (рис. 6) показывает, что при переходе от первого циклита к девятому происходит постепенное увеличение среднего содержания  $SiO_2$  и уменьшение –  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $K_2O$  и  $Fe_2O_{3ofut}$ . Среднее содержание  $Na_2O$  постепенно увеличивается до четвертого циклита, а потом уменьшается. Более сложное поведение характерно для MgO, который до четвертого циклита уменьшается, затем увеличивается, достигая максимума в шестом циклите, после чего снова начинает уменьшаться.

Для характеристики химического состава терригенной составляющей пород нами использован ряд литохимических модулей и диаграмм Я.Э. Юдовича, М.П. Кетрис [2000], а также известные индексы химического изменения  $CIA = 100 \cdot Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$  [Nesbitt, Young, 1982; Visser, Young, 1990], химический индекс выветривания  $CIW = 100 \cdot Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)$  [Harnois, 1988] и индекс изменения состава привносимого вещества ICV =  $(Fe_2O_{30600} + K_2O + Na_2O + CaO^* + K_2O + Na_2O + CaO^* + CaO^*)$ + MgO + MnO + TiO<sub>2</sub>)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Cox et al., 1995]. Bce они позволяют реконструировать климатические обстановки в областях питания и степень зрелости поступающей в осадочный бассейн алюмосиликокластики. При расчете индексов оксид кальция не использовался, т.к. ранее был полностью пересчитан на карбонатную фазу.

Корреляция между модулями TM = TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ЖМ = (Fe<sub>2</sub>O<sub>3общ</sub> + MnO)/(TiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) слабая отрицательная (*r* от -0.40 до -0.03), а между HKM = (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ГМ = (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + + TiO<sub>2</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3общ</sub> + MnO)/SiO<sub>2</sub> изменяется от слабой отрицательной (*r* = -0.35) до слабой положительной (*r* = 0.32). Это, согласно представлениям Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис [2000], позволяет отнести весь терригенный материал мергелей к преимущественно литогенному типу, т.е. к породам, прошедшим более одного седиментационного цикла.

На диаграмме  $log(SiO_2/Al_2O_3)-log(Fe_2O_{306m}/K_2O)$  [Herron, 1988] подавляющее большинство точек состава терригенной составляющей приурочено к полям сланцев, в единичных случаях их ожелезненных разностей, и вакк (рис. 7). Близкий характер распределения ранее был получен для молассовых отложений



**Рис. 6.** Вариации среднего содержания основных оксидов терригенной составляющей и медианных значений ГМ и ЩМ в соликамских глинисто-карбонатных породах. 1 – скв. 2211; 2 – скв. 2010.



**Рис.** 7. Точки состава терригенной составляющей пород соликамской свиты на классификационной диаграмме log(SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)–log(Fe<sub>2</sub>O<sub>3oбш</sub>/K<sub>2</sub>O) [Herron, 1988].

расположенной южнее Юрюзано-Сылвенской впадины [Литогеохимия..., 2015]. Однако растянутое положение фигуративных точек мергелей на диаграмме  $\Phi M$ -НКМ ( $\Phi M = (Fe_2O_{306m})$ + MnO + MgO)/SiO<sub>2</sub>) [Юдович, Кетрис, 2000] (рис. 8) позволяет говорить об изменении состава поступающего терригенного материала в течение соликамского осадконакопления. Так, для первых трех циклитов точки состава локализованы преимущественно в областях V (хлорит, смектит и иллит) и VI (преимущественно иллитовые глины со значительным количеством калиевых полевых шпатов), тогда как большая часть точек четвертого-девятого циклитов сконцентрирована в поле VI. Эти выводы подтверждаются и ранее опубликованными данными по составу мергелей соликамской свиты [Калинина,

Чайковский, 2015; Исаева, Калинина, 2016], согласно которым основная доля глинистых минералов относится к иллит-смектитовой и хлоритсмектитовой ассоциациям.

Об изменении состава глинистой составляющей свидетельствует и анализ изменения величины ГМ: несмотря на широкий диапазон значений – от 0.13 до 0.66 (от гипо- до суперсиаллитов по классификации Я.Э. Юдовича) – вверх по разрезу происходит ее постепенное уменьшение (см. рис. 6). При этом поведение  $IIIM = Na_2O/K_2O$  изменчивое: до четвертого циклита его значение увеличивается (породы изменяются от нормо- до гиперщелочных), а затем отмечается устойчивое уменьшение (см. рис. 6) (от супершелочных к преимущественно нормощелочным). Данные вариации позволяют предполагать,



**Рис. 8.** Положение фигуративных точек терригенной составляющей в породах соликамской свиты на диаграммах ФМ-НКМ.

I — в составе глинистого вещества доминирует каолинит; II — преобладает смектит, присутствует каолинит, встречается иллит; III — доминирует хлорит при подчиненной роли Fe-слюд; IV — хлорит и иллит; V — хлорит, смектит и иллит; VI — преимущественно иллитовые глины со значительным количеством калиевых полевых шпатов. Границы полей — по данным [Юдович, Кетрис, 2000]; арабскими цифрами обозначены порядковые номера циклитов.

что в течение соликамского времени происходило постепенное изменение состава привносимого поверхностными водами терригенного материала в сторону более кварцевого с более высоким содержанием калиевых полевых шпатов.

Приведенные данные согласуются с вариациями средних значений индексов CIA и CIW (рис. 9), которые изменяются практически одинаково. Наименьшие значения индексов, свидетельствующие о поступлении с водосборов литохимически наименее зрелого материала, приходятся на четвертый—пятый циклиты, что подтверждается и наиболее высокими средними значениями ICV в этих циклитах.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование соотношения кальцита, доломита и глины позволило по-новому провести расчленение соликамской свиты, что особенно актуально для краевой части Соликамской впадины, где не сохранились или не откладывались прослои каменной соли, типичной для центральной части депрессии.

В целом, седиментация в Соликамском бассейне в соликамское время происходила на фоне постепенной смены эвапоритовой обстановки морской. Однако цикличность осадконакопления определялась периодическим

Пикпит	C	IA	СГ	W	IVC		
Циклип	60 7	0 80	60 80	100	0.5	2.0	
IX		1		•	Ţ		
VIII		•		•			
VII		•	•				
VI				7	┭┥		
V	•		*				
IV		-	•	•			
III					+ •		
II				+			
Ι		4		•		- 1 - 2	

**Рис. 9.** Вариации медианных значений индексов СІА, СІW и ICV по разрезу соликамской свиты. 1 – скв. 2211; 2 – скв. 2010.

привносом во впадину алюмосиликатного материала с суши, обуславливающего смену доломитовой и кальцитовой садки накоплением глинистых осадков. Роль сульфатного материала представляется не столь индикаторной для выявления циклитов, как считалось ранее, поскольку наряду с седиментационными прослоями присутствуют горизонты диагенетического ангидрита.

Вариации по разрезу содержания петрогенных оксидов и значений геохимических модулей, рассчитанных для терригенной составляющей соликамских мергелей, отражают как изменение состава размываемых пород на водосборах, так и различную степень их гипергенного преобразования. Преобладающим источником терригенной составляющей в начале соликамского времени служили породы основного состава, что проявилось в расположении фигуративных точек преимущественно в поле глин "хлорит-смектитового состава" на диаграмме ФМ-НКМ. В конце соликамского времени в бассейн поступали продукты разрушения пород среднего и кислого состава, что привело к обогащению осадка кварцем, калиевым полевым шпатом и иллитом.

Минимальные значения индексов CIA, CIW и максимальные – ICV указывают на наибольшую литохимическую зрелость (выветрелость) материала подошвенной и кровельной частей соликамской толщи и наименьшую — четверто-го-пятого циклитов.

Таким образом, литохимические особенности соликамской свиты Соликамской впадины Предуральского краевого прогиба обусловлены как обстановками осадконакопления (эвапоритового и морского) в бассейне, так и вариациями состава и степени выветривания пород на прилегающих водосборных площадях разрушающегося Уральского орогена.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарят Е.П. Чиркову, О.В. Коротченкову и О.С. Каблинова (Горный институт УрО РАН, г. Пермь) за помощь в отборе проб и проведении анализов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 124020500052-9) "Процессы рудообразования и гипергенной трансформации эвапоритов Пермского Предуралья".

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Валяшко М.Г. К познанию основных физико-химических закономерностей в развитии соляных озер // Доклады Академии наук СССР. 1939. Т. 23. № 7. С. 688–693.

Вишняков С.Г. Карбонатные породы и полевое исследование их пригодности для известкования почв. Л.: Типография им. Котлякова, 1933. 21 с. (Карбонатные породы Ленинградской области, Северного края и Карельской АССР: в 13 брошюрах.)

Иванов А.А., Воронова М.Л. Верхнекамское месторождение калийных солей. Л.: Недра, 1975. 219 с.

*Игнатьев В.И.* Формирование Волго-Уральской антеклизы в пермский период. Казань: Изд-во Казанского унив-та, 1976. 256 с.

Исаева Г.А., Калинина Т.А. Глинистые минералы в зоне выветривания надсолевых отложений Верхнекамского месторождения // Уральская минералогическая школа – 2016. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2016. С. 39–42.

Калинина Т.А. Текстурно-структурная характеристика сульфатных отложений Пермского Прикамья // Стратегия и процессы освоения георесурсов // Сборник научных трудов. Вып. 10. Пермь, 2012. С. 10–12. Калинина Т.А., Чайковский И.И. Литохимия пелитоморфных пород соликамской свиты Верхнекамского месторождения солей // Горное эхо. 2015. № 1(58). С. 28–32.

Калинина Т.А., Чиркова Е.П., Чайковский И.И. Геохимия терригенно-карбонатных и сульфатных пород соликамской свиты Соликамской впадины (Предуральский краевой прогиб) // Вестник Пермского университета. Геология. 2016. Вып. 1. С. 14–25.

Копнин В.И. Соликамский калиеносный бассейн // Пермская система Земного Шара: путеводитель геол. экскурсий. Ч. 3. Пермское Приуралье. Свердловск, 1991. С. 103–135.

*Кудряшов А.И.* Верхнекамское месторождение солей. М.: Эпсилон Плюс, 2013. 368 с.

Литогеохимия терригенных ассоциаций южных впадин Предуральского прогиба / Отв. ред. А.В. Маслов / Маслов А.В., Мизенс Г.А., Бадида Л.В. и др. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2015. 308 с.

*Маслов А.В.* Некоторые литогеохимические и изотопно-геохимические особенности глинистых пород и перерывы в стратотипе рифея // Литосфера. 2024. Т. 24. № 1. С. 29–48. https://doi.org/org/10.24930/1681-9004-2024-24-1-29-48

Методы анализа рассолов и солей / Отв. ред. Ю.В. Морачевский, Е.М. Петрова // Труды ВНИИГ. Вып. 47. М.: Изд-во "Химия", 1965. 404 с.

*Мигунов Л.В.* Инфильтрационная минеральная зональность надсолевых толщ. СПб.: Наука, 1994. 150 с.

*Мизенс Г.А.* Верхнепалеозойский флиш Западного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 230 с.

Оборин А.А., Хурсик В.З. Литофации нижнепермских отложений пермского Предуралья // Труды ВНИГНИ (Камское отделение). Вып. 118. Пермь: Пермское книжное изд-во, 1973. С. 151–183.

*Трапезников Д.Е.* Палеогеографические и палеотектонические обстановки Соликамской впадины в уфимское время / Автореф. ... дисс. канд. геол.-мин. наук. Пермь, 2019. 20 с.

*Третьяков Ю.А., Сапегин Б.И.* Стратификация соляномергельной толщи района Верхнекамского месторождения калийных солей. // Строение и условия образования соленосных формаций. Новосибирск: Наука, 1981. С. 52–59.

Чайковский И.И., Бубнова М.В. Геохимия пелитоморфных пород Соликамской свиты // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского // Сборник научных статей. Вып. 24. Пермь: ПГНИУ, 2021. С. 286–295. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.

*Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L.* The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in southwestern United States // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. P. 2919–2940.

*Harnois L.* The CIW index: a new chemical index of weathering // Sediment. Geol. 1988. V. 55(3–4). P. 319–322.

*Herron M.M.* Ceochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log date // J. Sed. Petrol. 1988. V. 58. P. 820–829.

*Jenkyns H., Macfarlane S.* The chemostratigraphy and environmental significance of the Marlstone and Junction Bed (Beacon Limestone, Toarcian, Lower Jurassic, Dorset, UK) // Geol. Mag. 2022. V. 159. P. 357–371.

*Knudsen Ch., Lauridsen B.* Geochemistry of the Maastrichtian Rordal Member, Jylland, Denmark: Ce anomaly as a palaeoredox proxy // GEUS Bulletin. 2016. № 35. P. 51–54. https://doi.org/10.34194/geusb.v35.4926

*Lei H., Huang W., Jiang Q. et al.* Genesis of clay minerals and its insight for the formation of limestone marl alterations in Middle Permian of the Sichuan Basin // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. V. 218. n. page. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111014

*Liang Ch., Cao Y., Jiang Z. et al.* Shale oil potential of lacustrine black shale in the Eocene Dongying depression: Implications for geochemistry and reservoir characteristics // AAPG Bulletin. 2017. V. 101(11). P. 1835–1858. https://doi.org/10.1306/01251715249

*Naujokaitytė J., Garb M.P., Thibault N. et al.* Milankovitch cyclicity in the latest Cretaceous of the Gulf Coastal Plain, USA // Sediment. Geol. 2021. V. 421. n. page. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2021.105954

*Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. V. 299. P. 715–717.

*Nohl T., Steinbauer M., Sinnesael M. et al.* Detecting initial aragonite and calcite variations in limestone-marl alternations // Sedimentology. 2021. V. 68(7). n. page. https://doi.org/10.1111/sed.12885

*Visser J.N.J., Young G.M.* Major element geochemistry and paleoclimatology of the Permo-Carboniferous glaciogene Dwyka Formation and post-glacial mudrocks in Southern Africa // Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol. 1990. V. 81. P. 49–57.

*Yasukawa K., Tanaka E., Miyazaki T. et al.* High-dimensional chemostratigraphy of pelagic clay in the western North Pacific Ocean revealed via an unsupervised clustering aproach // Paleoceanogr. Paleoclimatol. 2023. V. 38. P. 1–21.

https://doi.org/org/10.1029/2023PA00464

УТКИНА, ЧАЙКОВСКИЙ

# LITHOCHEMICAL CYCLICITY OF THE SOLIKAMSK FORMATION IN THE SOUTH-WESTERN PART OF THE SOLIKAMSK DEPRESSION (LOWER PERM, PERM KRAI)

T. A. Utkina<sup>1, \*</sup>, I. I. Chaikovskiy<sup>1, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Mining Institute, Ural Branch of the RAS, Sibirskaya str., 78-A, Perm, 614007 Russia \*e-mail: tatyanaak89@mail.ru \*\*e-mail: ilya@mi-perm.ru

New data on the lithochemistry of clay-and-carbonate rocks of the Solikamsk Formation (Ufimian stage of the lower Permian) in the southwestern part of the Solikamsk depression of the Pre-Ural foredeep are presented. The cyclicity of sedimentation was determined by the introduction of aluminum-and-silicate materials into the evaporite and then into the marine basin by land waters. In the Solikamsk formation nine cyclites have been identified, in which the content of clay minerals in the rock first gradually increases and then relatively decreases (for carbonates (dolomite + calcite) the reverse distribution is inherent). The presence of sulfate layers is not related to the general direction of Solikamsk sedimentation, but only reflects individual periods of increased evaporitization. Analysis of the chemical composition of the terrigenous component of the Solikamsk rocks and the main paleoclimatic indices (CIA, CIW and ICV) made it possible to show the difference in the incoming material. At the beginning of Solikamsk time, the paleobasin received predominantly petrochemically mature material, probably significantly clayed with a high content of quartz. In the middle of the Solikamsk time, it was replaced by less weathered material (rocks of basic and intermediate composition). At the end of the Solikamsk time, terrigenous material, predominantly of quartz and potassium feldspar composition, was brought into the paleobasin by land waters.

*Keywords:* lithochemical cyclicity, marls, stratification and correlation of evaporites, Ufimian stage, Verkhnekamskoe salt deposit