

УДК 553.98
МРНТИ 38.53.17

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108770>

Получена: 25.07.2024.
Одобрена: 29.11.2024.
Опубликована: 31.12.2024.

Научный обзор

Пермские эвапоритовые комплексы мира. Краткий обзор возможных аналогов кунгурских отложений Прикаспийского мегабассейна

П.Е. Сынгаевский¹, С.Ф. Хафизов²

¹*Chevron, г. Хьюстон, Техас, США*

²*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Эвапоритовые комплексы пермского возраста описаны, кроме Прикаспийского и Чу-Сарысуйского, во многих бассейнах: Амазонском (Амазонас и Солимос), Паранаиба, Пермском мегабассейне (Делавэр, Мидланд), достаточно хорошо изученные области развития формации Цехштейн в средней Европе и Орн – в северной, Хуфф (Khuff) на Аравийском полуострове и т.д. В статье рассматриваются особенности формирования (их сходства и различия) наиболее хорошо изученных среди этих толщ, а также обсуждаются вопросы глубины палеобассейнов на момент начала и завершения формирования эвапоритовых толщ.

Корректное определение глубин палеобассейнов очень важно, поскольку оно отражается на результатах прогноза нефтегазоносности, в первую очередь, за счёт влияния на термобарические условия, в которых находятся все основные элементы углеводородных систем, в частности, нефтегазоматеринские толщи. Изучение аналогов позволяет относиться критически к результатам расчетов по конкретным бассейнам. В статье отмечается, что большинство из рассмотренных комплексов имеют мелководно-морскую или континентальную природу, что отличает их от Прикаспийского мегабассейна, где соли подстилаются глубоководными отложениями. Тем не менее они дают важную информацию для уточнения его модели и последующего прогноза нефтегазоносности.

Ключевые слова: эвапоритовый комплекс, солеродный бассейн, пермский период, суперконтинент Пангея, циклостратиграфия, глубина палеобассейна.

Как цитировать:

Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Пермские эвапоритовые комплексы мира. Краткий обзор возможных аналогов кунгурских отложений Прикаспийского мегабассейна // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2024. Том 6, №4. С. 8–24. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108770>.

UDC 553.98
CSCSTI 38.53.17

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108770>

Received: 25.07.2024.

Accepted: 29.11.2024.

Published: 31.12.2024.

Review article

Permian evaporites strata of the World: a brief review of possible analogs of the Kungurian sediments of the Pre-Caspian mega-basin

Pavel E. Syngaevsky¹, Sergey F. Khafizov²

¹*Chevron, Houston, Texas, USA*

²*Gubkin University, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Evaporites of the Permian age, except for the Pre-caspian and Chu-Sarysu basins, have been described in many basins: Amazonian (Amazonas and Solimos), Paranaiba, Permian mega-basin (Delaware, Midland), well-studied areas of development of the Zechstein Formation in middle Europe and the Orn Formation in northern Europe, Khuff on the Arabian Peninsula, etc. This article discusses the peculiarities of the formation of the most studied strata, highlighting their similarities and differences, as well as the depth of paleo-basins at the beginning and completion of the evaporite strata formation. Accurate estimation of paleo-basin depths is essential, as it affects the results of prediction of oil and gas occurrence. This is primarily due to its influence on the thermobaric conditions affecting the key components of hydrocarbon systems, particularly, hydrocarbon source strata. The study of analogs allows for a thorough analysis of the results obtained from calculations specific to each basin. The article emphasizes that most of the complexes being examined are of shallow-marine or continental nature, which distinguishes them from the pre-Caspian mega-basin, where salts are situated beneath deep-water sediments. However, these complexes offer valuable insights that can help refine the model and improve subsequent prediction of oil and gas occurrence.

Keywords: *evaporite complex; salt basin; Permian period; Pangaea supercontinent; cyclostratigraphy; paleobasin depth.*

To cite this article:

Syngaevsky PE, Khafizov SF. Permian evaporites strata of the World: a brief review of possible analogs of the Kungurian sediments of the Pre-Caspian mega-basin. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2024;6(4):8–24. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108770>.

ӨЖ 553.98

FTAХР 38.53.17

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108770>

Қабылданды: 25.07.2024.

Мақұлданды: 29.11.2024.

Жарияланды: 31.12.2024.

Ғылыми шолу

Әлемнің пермь эвапорит кешендері. Каспий маңы бассейнінің кунгур шөгінділерінің ықтимал аналогтарына қысқаша шолу

П.Е. Сынгаевский¹, С.Ф. Хафизов²

¹*Chevron, Хьюстон қаласы, Техас, АҚШ*

²*И.М. Губкин атындағы мұнай және газ РМУ (ФЗУ), Мәскеу қаласы, Ресей*

АННОТАЦИЯ

Пермь жасындағы эвапорит кешендері Каспий маңы мен Шу-Сарысу кешендерінен басқа көптеген бассейндерде сипатталған: Амазонка (Амазонас және Солимос), Паранаиба, Пермь мегабассейні (Делавэр, Мидленд), Орталық Еуропадағы және солтүстіктегі Орн, Араб түбегіндегі Хуфф (Хуфф) және т. б. Цехштейн формациясының дамуының жақсы зерттелген салалары. Мақалада осы қабаттардың арасында жақсы зерттелген қалыптасу ерекшеліктері (олардың ұқсастықтары мен айырмашылықтары) қарастырылады, сонымен қатар эвапорит қабаттардың пайда болуы басталған және аяқталған кездегі палеобассейндердің тереңдігі мәселелері талқыланады.

Палеобассейндердің тереңдігін дұрыс анықтау өте маңызды, өйткені ол мұнай-газды болжау нәтижелерінде, ең алдымен, көмірсутек жүйелерінің барлық негізгі элементтері, атап айтқанда мұнай-газ-аналық қабаттар орналасқан термобариялық жағдайларға әсер ету арқылы көрінеді. Аналогтарды зерттеу белгілі бір бассейндердегі есептеу нәтижелеріне сыни көзқараспен қарауға мүмкіндік береді. Мақалада қарастырылған кешендердің көпшілігі таяз теңіз немесе континенттік сипатқа ие екендігі атап өтіледі, бұл оларды Каспий маңындағы мегабассейннен ерекшелендіреді, мұнда тұздар терең теңіз шөгінділерімен қапталған. Дегенмен, олар оның моделін нақтылау және мұнай мен газдың кейінгі болжамы үшін маңызды ақпарат береді

Негізгі сөздер: эвапорит кешені, солерод бассейні, Пермь кезеңі, Пангея суперконтиненті, циклостратиграфия, палеобассейн тереңдігі.

Дәйексөз келтіру үшін:

Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Әлемнің Пермь эвапорит кешендері. Каспий маңы бассейнінің кунгур шөгінділерінің ықтимал аналогтарына қысқаша шолу // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2024. 6 том, №4. 8–24 б. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108770>.

Введение

Метод аналогий был и остаётся одним из самых надёжных способов получения знаний о Земле. Как правило, речь идет об идентификации объектов, имеющих сходную историю структурно-тектонического развития, что позволяет предположить и некоторую общность геологического строения, что актуально для перенесения представлений, полученных при анализе хорошо изученных объектов, на те объекты, информации о которых недостаточно. Прикаспийский мегабассейн, несомненно, относится к таковым. Несмотря на 125-летнюю историю более или менее систематического изучения, значительная территория его разреза, особенно в наиболее погруженной центральной части, остаётся практически неисследованной. Авторы уже обращались к теме использования аналогов [1], предлагая в качестве таковых бассейны Тарим (Китай), Каннинг (Австралия), бассейн Мексиканского залива и Пермский (США); последний был выбран в качестве наиболее близкого и изученного.

В то же время далеко не все особенности строения укладываются, главным образом, в историю тектонического развития, имея при этом существенное влияние, например, на формирование и функционирование углеводородных систем и вообще распределение полезных ископаемых. К таковым, в частности, относятся наличие периодов существования солеродных бассейнов и их специфика по отношению к возможным аналогам. Мощнейший соленосный комплекс Прикаспийского мегабассейна формировался в основном в конце раннепермского времени, но оказывал значительное влияние на условия осадконакопления практически до завершения триасового периода.

Пермо-триасовый интервал геологической истории был временем достаточно экстремальных условий, связанных с необычно тёплым климатом и засушливыми условиями на огромных территориях, которые вместе с избыточной вулканической активностью привели к нескольким кризисам животного и растительного мира. В это время на территории суперконтинента Пангея (рис. 1) были широко распространены системы солёных озёр с повышенной кислотностью, а на погружениях окраин формировались глубокие области авлакогенов (будущих седиментационных бассейнов). Это подтверждается различными глобальными реконструкциями [2–5].

Анализ обширной базы данных по 760 осадочным бассейнам мира показал, что эвапоритовые комплексы чаще всего встречаются в депрессиях пассивных окраин и предгорных прогибах. Всего было выявлено 369 стратиграфических интервалов с этими разностями с двумя отчётливыми максимумами в позднепермское и поздне триасовое время [7].

Области с мощными толщами эвапоритов пермского периода описаны в центральной Европе и на западе России. К основным объектам следует отнести раннепермские соляные отложения Баренцева моря (свита Орн), кунгурские разрезы Прикаспийской впадины, верхнепермские комплексы Цехштейна в Германии и бассейне Северного моря. Отмечаются хорошо задокументированные различные разрезы юго-запада США, группа Фенгченг Джунгарского бассейна (Китай) и свита Хуфф Ближнего Востока (рис. 2).

В триасе эвапориты связаны преимущественно с рифтовыми бассейнами Северной Америки, Африки и Европы, хотя возрастные границы во многих из них определены неточно [7]. Раннетриасовые и, возможно, верхнепермские разности описаны на восточном побережье Северной Америки (плато Блэйк и трог Каролины) и в бассейне Сычуань в Китае. Сюда же, вероятно, следует отнести и разрезы среднего триаса Южной Америки, верхнетриасовые в Мозамбике, на Ближнем Востоке и в Северной Африке.

Следует также отметить, что площади, занимаемые многими пермскими солеродными бассейнами, были не меньше, а зачастую и больше, чем площадь Прикаспийского бассейна (около 500 тыс. км²).

Эвапоритовые системы пермского времени

Свита Хуфф (P-T), Аравийский полуостров

Свита Хуфф, датируемая пермо-триасовым временем, выходит на поверхность в центральной части Саудовской Аравии, вдоль ориентированного с севера на юг пояса протяжённостью более 1200 км (рис. 3). Её средняя мощность составляет 170 м. В строении снизу вверх по разрезу выделяют 5 последовательных пачек: Аш-Шикка (ранее Унайзах), Хукаиль, Духайсан, Мидхнаб и Хартам. В основании свиты отмечается региональная поверхность несогласия с протерозойским фундаментом или нижнепалеозойскими отложениями. В кровле её согласно перекрывает региональная покрывка – свита Судуар, представленная преимущественно глинистыми разностями с прослоями ангидритов, глинистых карбонатов и песчаников, откладывавшихся в условиях приливо-отливных равнин, лагун и глинистого побережья. Свита датируется нижнетриасовым (оленекским, 251,2–247,2 млн лет) возрастом. Тектонически условия формирования этих комплексов связаны с пассивной континентальной окраиной, покрытой обширной шельфовой областью [9].

Пачка Аш-Шикка сложена тёмно-зелёными и буровато-красными разноцветными песчанистыми аргиллитами с прослоями гипса и желтовато-серыми песчанистыми доломитами в основании. Местами отмечаются оползни, окрашенные в более ярко-бурые цвета оксидами

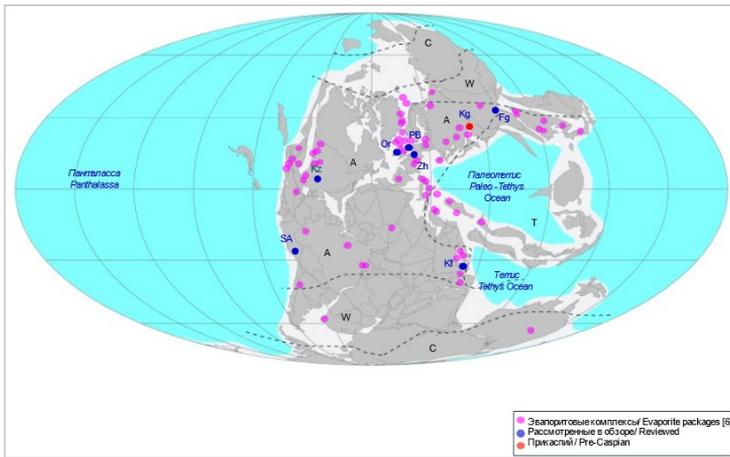


Рисунок 1. Положение основных эвапоритовых комплексов средне-позднепермского возраста (климатические зоны по Boucot [6]; палеоконтиненты в проекции Молвейде по Scotese [3])
Figure 1. Position of the major evaporite complexes of Middle-Late Permian age (climatic zones according to Boucot [6]; paleocontinents in the Molweide projection according to Scotese [3])

Климатические зоны: А – аридные; С – холодные; Т – тропические; W – теплые.

Разрезы: Fg – Фэнчен; Kf – Хуфф; Kg – Кунгур (Прикаспий); Kz – Канзас (Северная Америка); Or – Орн (Баренцево Море); PB – порт Белфаст; SA – Южная Америка; Zh – Цехштейн (Европа)

Climatic zones: A – arid; C – cold; T – tropical; W – warm.

Sections: Fg – Faengchen; Kf – Khuff; Kg – Kungur (Caspian Sea); Kz – Kansas (North America); Or – Orm (Barents Sea); PB – Port of Belfast; SA – South America; Zh – Zechstein (Europe).

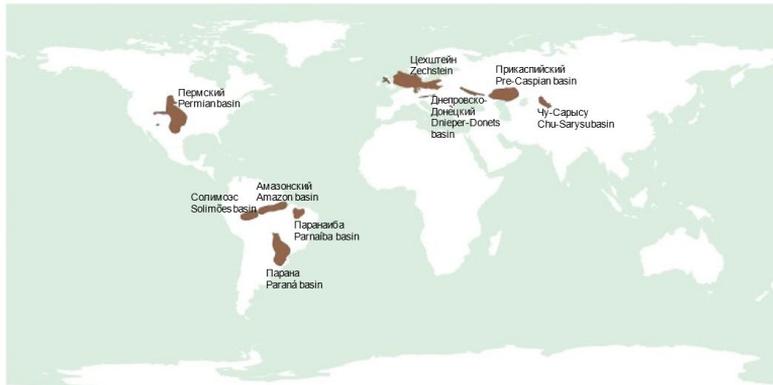


Рисунок 2. Положение основных эвапоритовых комплексов средне-позднепермского возраста [8]
Figure 2. Position of the major evaporite complexes of Middle-Late Permian age [8]

железа. В средней части присутствуют светлосерые мелкозернистые песчаники с косо́й слоистостью. В кровле отмечаются глинистые биокластические доломиты с водорослевыми прослоями и трещинами усыхания. Возраст пачки – среднепермский (капитанский, соответствует северодвинскому ярусу татарского отдела 264,3–259,5 млн лет). Суммарная мощность до 35 м, условия отложения – соляные марши и континентальные лагуны приливной полосы.

Пачка Хукайль мощностью 30–40 м представлена чередованием голубовато-серых гранулярных биообломочных доломитов, в кров-

ле – со следами биотурбации и зеленоватыми, желтоватыми доломитистыми и гипсовыми аргиллитами. Обстановки осадконакопления – различные участки себх, местами попадавших под воздействие приливов и отливов.

Пачка Духайсан мощностью 13,5 м залегает на частично переработанной поверхности отложений Хукайль. Она представлена светлыми глинистыми доломитами с прослоями биокластики и пелоидных включений в основании. Средняя часть пачки – глинистая, сложена доломитистыми и гипсоносными, светло-серыми до белого, аргиллитами. В кровельной части

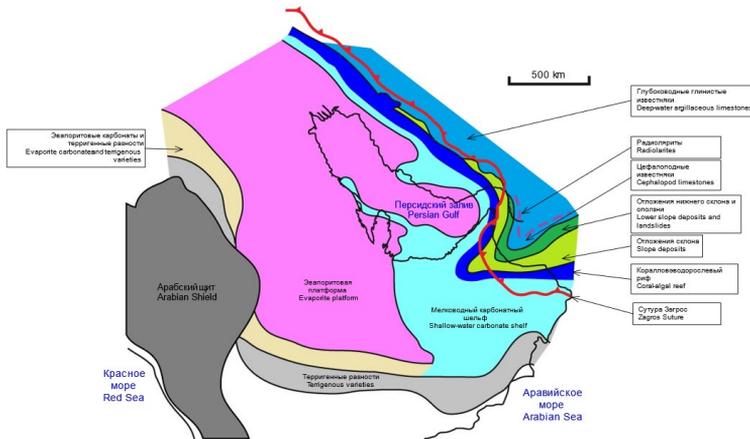


Рисунок 3. Основные лито-фациальные комплексы свиты Хуфф, Аравийской плиты и Ближнего востока [10]

Figure 3. Major litho-facial complexes of the Khuff Formation, Arabian Plate and Middle East [10]

встречены плитчатые, светлые, мелкозернистые, пелоидные известняки со следами биотурбации, водорослевыми прослоями и трещинами усыхания. Условия формирования – приливно-отливная полоса с ограниченным влиянием моря, в основании возможно влияние литоральной области.

Мидхнаб общей мощностью в 60 м, преимущественно глинистого состава, с прослоями известняков лагунного происхождения, глинистых и/или обогащенных гипсом желтоватых или голубоватых доломитов. В основании отмечается двухметровый конгломератовый прослой переработанных доломитовых известняков. Обстановки осадконакопления связаны с обширной и хорошо ограниченной от воздействия открытого моря шельфовой областью с многочисленными лагунами. Возраст определен как чансингский (вятский, 254,1–251,9 млн лет), верхняя пермь.

Разрез свиты Хуфф завершается группой пластов Хартан мощностью около 37 м. В ней выделяются две части. Нижняя (15 м) сложена пелоидными известняками, ракушечниками и доломитистыми аргиллитами, обогащенными терригенным материалом песчано-алевролитовой размерности. Отмечаются прослой охристых, железистых биокластических доломитов. Этот интервал относится к самой верхней перми. На ней согласно залегает вторая часть, датированная нижним триасом (индский ярус, 251,9–251,2 млн лет), мощностью более 30 м. Триасовые разности представлены чередованием доломитов, в различной степени заглинизированных и кальцитизированных, и известняков ракушечного, оолитового и микрокристаллического (строматолитового) типов. Условия формирования – преимущественно приливно-отливная полоса побережья и смежные литоральные области.

Свита Фэнчен (С-Р), Джунгарский бассейн, Северо-Западный Китай

Сравнительно недавно появились результаты работ, указывающие на существование эвапоритовых комплексов верхнего палеозоя в бассейне Джунгар, расположенном на северо-западе Китая. Согласно последним данным, возраст этих отложений определен как верхнекаменноугольный – раннепермский (касимовско-ассельский, 305–296 млн лет [11]). Их накопление происходило в серии грабенов растяжения и в условиях хорошо стратифицированных пересоленных озер. Данные геохимии указывают на вероятную их связь с вулканической активностью региона, которая внесла заметный вклад в формирование отложений карбоната натрия – трон (двойных солей, содержащих карбонат и гидрокарбонат натрия $\text{Na}_2(\text{CO}_3) \cdot \text{Na}(\text{HCO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – и последующее частичное замещение на вегшейдерит $\text{Na}_3[\text{CO}_3](\text{HCO}_3)_2$ и нахколит (NaHCO_3). На границе каменноугольного и пермского периодов, во время позднепалеозойского оледенения Джунгарский бассейн находился на отметках 45–50 N от палеоэкватора. Данные палеогеографии (обширные области озёр) и глобальные реконструкции позволяют предположить существование здесь относительно тёплого и засушливого климата.

Геохимические материалы (биомаркеры) указывают, что общие условия формирования этой свиты связаны с областями анокисии в пересоленных стратифицированных обширных лагунах. Здесь выделяются три последовательные пачки (цикла) седиментации, в верхней из которых отмечается влияние притоков более пресных вод и связанной с ними органики. Центральная область лагуны находилась под воздействием гидротермальных источников, а окраинные области – вероятной вулканической

активности, выраженной в поступлении обильного глинистого материала и повышении уровня кислорода.

Свита Эвапориты Порта Белфаст, Северная Ирландия (P–T?)

Породы этой свиты мощностью около 180 м выделяются в бассейне Ларни, расположенном в Северной Ирландии. Этот палеобассейн представляет собой вытянутую с северо-востока на юго-запад структуру, образовавшуюся в карбоне на древнем терреине Мидлендская Долина и, по сравнению с другими палеозойскими разрезами, ещё недостаточно изученную. Подстилающие свиту эвапориты порта Белфаст породы представлены песчанистыми известняками свиты Магнезиальные известняки с обилием гастропод и двустворок [12]. Эвапориты порта Белфаст датируются гваделупским – лопингианским возрастом (264–259,5 млн лет, северодвинский ярус татарского отдела) преимущественно на основании мiosпоровых комплексов, перекрывающих их аргиллитов толщи Уайт-Брей. Точная граница перми и триаса в этих разрезах пока не проведена.

Среди литологических разностей в разных количествах присутствуют ангидриты, гипсы, аргиллиты, алевролиты, оолитовые и микритовые известняки и брекчии. В 2015 г. здесь, в графстве Антрим, была пробурена опорная скважина Айлендмейджи. В ней для изучения солёности пермского разреза отобрали 177,5 м керна, в составе которого были обнаружены аргиллиты, ангидрит, каменная соль (преимущественно галит) и базальты. В настоящее время детали фотографии, петрографические отчёты и оставшийся каменный материал (около 25% керна было использовано) находятся в кернаохранилище Геологической службы Северной Ирландии в г. Белфаст¹.

Результаты детального седиментологического, геохимического и спектрального анализов этого разреза, выполненных в Университете Западной Вирджинии (США), показали наличие слоистого галита (до 67% разреза), а также ангидрита и аргиллита в подчинённых количествах (порядка 2%). Эти разности пересекали интрузии базальтового состава, которые составляли до 3% общей мощности. Остальные 26% разреза остались неохарактеризованы каменным материалом. Пласты галита характеризуются постепенной сменой окраски снизу вверх по разрезу от мутной светло-серой к розовой, отдельные слои от 0,5 до 1,5 см и содержат разнообразные осадочные текстуры. Эвапоритовый разрез завершает толща ангидрита [13]. Встречаются три типа кристаллов галита: а) шевронные, растущие на дне;

б) корнетовые «кульковые», растущие на дне; в) «цветущие» корки поверхности. Первые два типа начинают своё формирование на плоской поверхности и нарастают вверх; в них отмечается обилие газожидких и глинистых включений. Также в них редко встречаются тонкие глинистые прерывистые покровы – корки. По всему разрезу в галите отмечены многочисленные твёрдые включения кристаллов силвина. Отдельные вертикальные цилиндрические трубки – вероятно, полости выщелачивания – выполнены чистым галитом. Глинистые разности присутствуют в некоторых прослоях с резкими контактами в кровле и подошве. Массивные аргиллиты сложены зёрнами алевролитовой размерности, окатанными и отсортированными, с окраской от тёмно-серой до кирпично-красной. В других интервалах встречаются обильная волнистая и прерывистая слоистость, интракласты, косая слоистость восходящей ряби и трещины усыхания. В качестве диагенетических изменений присутствует цементация и заполненные галитом трещины.

Вулканические интрузии тёмного, почти чёрного цвета, на контакте с галитом – зелёного, представлены базальтом. Вмещающие породы вокруг них покрыты сетью трещин, в отдельных случаях базальты также трещиноваты, а трещины в них выполнены галитом. Обстановка осадконакопления интерпретируется как обширное солёное озеро (или система озёр), окружённое глинистыми равнинами, и относится к континентальному типу. Воды жидких включений относятся к непродолжительным мелководным водоёмам приповерхностных областей.

Свита Орн С3-P2-3, Норвежский сектор Баренцева моря

Свита получила свое название от норвежского слова «оёрн» – «орёл», вероятно, из-за того, что на северном побережье встречается, по крайней мере, три вида этой птицы. Мощность меняется от 150 до 200 м, а в погружённых частях возрастает до 1000 м. Представлена преимущественно мелководно-морскими разностями карбонатной платформы и переслаиванием карбонатов и эвапоритов в более дистальных бассейновых частях. В карбонатах присутствует значительное количество биоты тёплых вод с преобладанием небольших фораминифер, фузулинд и кальцитовых водорослей. В разрезах также отмечаются остатки лилий (криноидей), мшанок, брахиопод и кораллов. Терригенные породы выделены в незначительных количествах, а ритмичное строение толщи связано с чередованием карбонатных, а в более дистальной части – карбонатных и эвапоритовых разностей.

¹ Геологическая служба Северной Ирландии (Geological Survey Northern Ireland) — отделение Министерства экологии Северной Ирландии, в котором работают ученые из Британской Геологической Службы (British Geological Survey). Служба предоставляет профессиональные, технические и научные исследования, услуги по обработке данных и управлению архивами, чтобы информировать о развитии экономики Северной Ирландии и помочь защитить ее окружающую среду. <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/gsnif/>

Литологически отложения свиты представлены известняками, доломитами и эвапоритами с подчинённым количеством мергелей и аргиллитов, приуроченных к верхней части разреза. Отмечаются доломитовые ваккиты и плотные разности (баундстоуны) с обилием водородослевых фрагментов, которые интерпретируются как рифовые постройки (холмы). С ними связаны интервалы зернистых разностей с ангидритовой цементацией и желваками, интерпретируемые как образования протяжённой карбонатной платформы.

В более глубокой и мощной части разреза свита сложена светло-серыми и коричневатыми доломитистыми аргиллитами и плотными пакстоунами. Они чередуются со светло-серыми и белыми ангидритами, доля которых заметно возрастает в сторону депоцентра. По данным кернa ряда скважин, в основании отмечаются толщи ритмичного переслаивания тёмных, зеленовато-серых карбонатных аргиллитов и светло-серых известняков, обогащённых животными остатками и кремнистыми конкрециями. Они постепенно замещаются на тонкие чередования доломитов, в осадочной массе – с преобладанием галита.

По данным комплексной интерпретации сейсморазведки, свита Орн формировалась в результате частых колебаний уровня моря с большой амплитудой [14]. Области терригенной седиментации оказывались погружёнными, и на их месте в условиях мелководья начиналось формирование разнообразных комплексов карбонатных платформ. Вверх по разрезу они сменялись на комплексы полупустынных побережий, представленных себкхами, с которыми связаны мощные доломитовые глинистые толщи с ангидритовыми желваками. В более погружённых частях отмечаются рифовые образования, полученные в результате наложения друг на друга нескольких построек. Их разделяют интервалы переслаивания карбонатов (при высоком стоянии уровня моря) и ангидритов (при последующем понижении). В центральных частях палеобассейнов, в результате частичной или почти полной изоляции формировались отложения солей (галита).

Крупное затопление, произошедшее на границе ассельского и сакмарского веков (293,5 млн лет), привело к смене режима седиментации на платформах. Верхняя часть свиты характеризуется ритмичными переслаиваниями с преобладанием мергелей внешних частей шельфа и ваккитов, переходящих в плотные пакстоуны. Результаты переработки сейсмички и скважинных данных позволили выделить в пределах Норвежского сектора Баренцева моря (Финской платформы) 7 глубоко расположенных грабенов каменноугольного возраста, в 5 из которых обнаружены эвапориты, расположенные стратиграфически выше толщи [14].

Эвапоритовые комплексы пермского возраста Южной Америки

Бассейн Солимоес находится на севере Бразилии, где занимает площадь более 600 тыс. км², из которой около 400 тыс. км² связано с палеозойскими отложениями. Вместе с расположенным на востоке бассейном Амазонас он образует отчётливую внутриконтинентальную структуру, ориентированную с запада на восток. Протяжённость этой депрессии оценивается в 2500 км при ширине в 500 км и мощностях осадочного чехла до 5000 м. Большая часть этих бассейнов находится в труднопроходимой тропической области южноамериканской сельвы. Восточная оконечность обособляется в отдельный суббассейн Джуруа, в котором выявлены промышленные залежи углеводородов.

Здесь выделяются 4 крупных цикла палеозойских комплексов, разделённых поверхностями несогласия [15]. На начальной стадии каменноугольно-пермского цикла здесь происходило отложение субконтинентальных комплексов. В основании развиты покровы золотых песчаников свиты Джуруа, которые вверх по разрезу переходят в ритмичную толщу (1300 м), чередования карбонатов и эвапоритов свиты Карауари. Последовательность завершается толщей флювиальных и красноцветных лагунных разностей, объединённых в свиту Фонте Боа. Во время этого цикла первый раз за свою историю обе структуры – Солимоес и Амазонас – были объединены в палеобассейн.

Бассейн Амазонас (Амазонский) расположен на севере Бразилии и занимает площадь в 500 тыс. км². Его осадочные породы залегают на докембрийских разностях Гайянского щита, а на юге – Центрально-Бразильского щита, выходящего на поверхность по краям. Породы фундамента представлены в основном извержёнными и метаморфическими разностями, однако на западе здесь также присутствуют протерозойские рифты, выполненные аллювиальными, флювиальными и лагунными породами группы Пурус. Максимальная мощность осадочного чехла в центральной части оценивается в 5000 м. Верхнепалеозойский цикл начинается здесь в раннем пенсильвании (323,2 млн лет, башкирский ярус) и объединён в группу Тапахос, сходную по строению с циклом бассейна Солимоес. В основании развиты покровы золотых песчаников свиты Монте Алегре, перекрытых карбонатами и эвапоритами свит Итайтуба и Нова Олинда максимальной мощностью до 1600 м, где в подчинённых количествах присутствуют песчано-глинистые прослои. Разрез завершает красноцветная толща свиты Андира пермского возраста.

Бассейн Паранаиба находится на северо-востоке Бразилии, где занимает площадь в 600 тыс. км². Он представляет собой депрессию округлой формы, с максимальными мощ-

ностями отложений в центральной части до 3500 м. Этот бассейн по периметру окружён практически непрерывной последовательностью обнажений, которые позволяют детально изучить разрез палеозоя. Это достаточно сложная в тектоническом плане структура, в которой пересекаются трансбразильская зона разлома и океаническая зона разломов Романш. В пределах Паранаибского палеобассейна они были выражены в виде широкой полосы поверхностных и глубинных деформаций и контролировали древние авлакогены и депоцентры палеозоя.

Осадочный разрез бассейна Паранаиба состоит из трёх палеозойских и двух мезозойских комплексов. Пермский этап его развития связан со структурной перестройкой и сменой обстановок седиментации. Форма депоцентра меняется с продолговатого грабена на более изометричную – округлую. При этом накопление отложений происходит во внутриконтинентальной депрессии с ограниченной циркуляцией и постепенным возрастанием палеотемператур. Группа Балкас пермско-триасового возраста представлена обломочно-эвапоритовыми разностями: мелко- и среднезернистыми песчаниками, бурыми аргиллитами с подчинённым количеством известняков и оолитов, белыми ангидритами с желтоватыми песчаниками свиты Педра де Фога. Эвапоритовые разности также присутствуют в свите Мотика, которую перекрывают золотые песчаники свиты Самбайба.

В бассейне Парана, расположенном в центральной части Бразилии и распространяющемся на территорию соседних стран (Парагвай, Аргентина, Уругвай), выделяется 6 крупных литостратиграфических мегациклов. В основании первого суперцикла (Гондвана-1), залегающего в нижней части 7000 м разреза осадочного чехла, описана мощная толща гляциогенных тиллитов, конгломератов и турбидитов позднекаменноугольного – раннепермского возраста. За ней следуют комплекс дельтовых песчано-глинистых разностей с углями артинско-кунгурского возраста (свиты Рио-Бонито и Палермо, 290,1–273 млн лет) и битуминозные сланцы с известняками и эвапоритами (свита Ирати). Этот разрез также завершается мощной толщей красноцветов Рио до Расто флювиального и лагунного происхождения.

Эвапоритовые комплексы пермского возраста Северной Америки

В пермское время большую часть юго-запада Северной Америки покрывало обширное мелководное внутреннее море, которое простиралось на север от западного Техаса до северо-западного Канзаса. Относительно медленное, но непрерывное опускание всех частей этого широкого палеобассейна привело к отложению мощных толщ красноцветов и эвапоритов, представленных чередованием доломитов, гипсов и ангидритов, калийных солей

и галита. Эвапоритовые комплексы пород отличаются здесь значительными толщинами с широким распространением и выдержанностью по латерали. Общая мощность отложений пермского периода в некоторых частях доходит до 2000 м, а отдельные подразделения, состоящие преимущественно из гипса, ангидритов и солей, меняются от 60 до 500 м. Наиболее древние эвапоритовые разности находятся на севере Пермского мегабассейна и в общем случае становятся все более молодыми в направлении на юг. Основные области накопления солей (выделяются в эвапориты группы Веллингтон) в раннепермское (280 млн лет, P1) время располагались на территории современного Канзаса и северо-запада Оклахомы. Они затем смещаются на юг и к концу пермского и раннепалеозойского времени (273 млн лет, P2) находятся в западной Оклахоме и предгорьях Техаса. Здесь выделяются свиты со значительной долей эвапоритов: нижний Кларк Форк / Симмарон (Ясная Развилка), верхний Кларк Форк / Симмарон и Сан-Андреас / Блейн. Наконец, в позднепалеозойское и мезозойское (лопингианское) время (259,5–251,9 млн лет, P2–P3) они переходят в западный Техас и юго-восточные области штата Нью-Мехико, где формируются свиты Артезия, Кастилия, Саладо и Растлер. Эвапориты представляют значительную экономическую ценность и разрабатываются открытым и/или шахтным способом. Галит добывается на 18 месторождениях, гипсы – на 15, калийные разности – на 5 подземных шахтах возле г. Карлсбад.

Пермский мегабассейн включает в себя несколько структур (бассейнов, сводов и платформенных участков) меньшего ранга. Основная часть депрессий была сформирована во время палеозойских деформаций Уачита и заполнялась терригенными, карбонатными и эвапоритовыми разностями в течение пенсильванского (323,2–298,9 млн лет, C3) и пермского времени [16]. Мегабассейн располагался на юго-западной окраине суперконтинента Пангея и, согласно палеогеографическим построениям, раскрывался на юго-запад, откуда в него поступали морские воды. В каждом из входящих в него палеобассейнов – Пало Дуро, Мидлан, Делавэр и Вал-Верде – после отложения карбонатно-терригенных комплексов начиналось накопление эвапоритовых разностей (рис. 4). Из-за различия в обстановках осадконакопления в Пермском мегабассейне есть возможность изучать целый спектр литофаций эвапоритов, сформировавшихся на различных глубинах, а также их последовательную смену. Многие соляные комплексы разрабатываются и/или используются как природные резервуары для захоронения отходов, поэтому пермские разрезы задокументированы очень хорошо.

В большинстве шельфовых интервалов отмечается определённая ритмичность фор-

мирования смешанных комплексов. В основании расположены преимущественно морские карбонатные разности, которые постепенно переходят в более пересолённые условия, в которых отлагались ангидриты, гипс и, наконец, галит. Такие циклы часто завершаются литофациями континентального типа с редким воздействием морских вод – глинисто-галитовым смесями и терригенными красноцветами [19]. Отдельные циклы хорошо прослеживаются от типично морских условий к эвапоритовым, поэтому полагают, что области шельфа со смешанной седиментацией были в определённой степени доступны воздействию открытого моря, и следовательно, уровень воды в них контролировался локальной эвстатикой. Присутствия локальных баров и отмелей на преимущественно карбонатном шельфе оказывалось достаточно для удержания рассолов, из которых выпадали гипс и галит. По мере заполнения пространства аккомодации находившиеся на севере пониженные участки характеризовались циклами, в которых часто отсутствуют нижние карбонатные разности, гипсы отмечаются преимущественно в тонких прослоях, а перекрывающие галиты, напротив, увеличены в мощности и содержат меньше глинистых прослоев.

Палеотопографический анализ материалов бассейна Делавэр показал наличие значительного рельефа между депоцентром и шельфом – от 300 до 550 м [20]. Шельфо-

вые области со всех сторон были окружены рифогенными комплексами, объединёнными в группу Капитан (Эль-Капитан). Отложенные в центральной части палеобассейна эвапориты свиты Кастил очоанского возраста (примерный эквивалент вятского яруса, 254,1–251,9 млн лет) не сопоставляются с осадками шельфового склона или сходными интервалами соседних погружённых участков, что, вероятно, говорит либо о полной изоляции этой территории и падении уровня локального бассейна ниже Мирового океана, либо о формировании этих соленосных толщ на дне глубокого палеобассейна [21]. В пользу первого предположения – глубокий палеобассейн с мелководными эвапоритами – говорит вероятный современный аналог таких условий – Долина смерти (пример современного бассейна-раздвиг), предлагаемый в качестве примера многими исследователями. Однако по данным Геологической службы, максимальная глубина этого объекта составляет всего 85 м ниже уровня Мирового океана.

Детальный анализ морфологии эвапоритовых тел в бассейне Делавэр указывает на их формирование в условиях стратифицированного водоёма, а их литологический состав уникален и не встречается в других палеодепрессиях Пермского мегабассейна. Регионально развитые пласты-маркеры мощностью до 1 м сложены богатым органикой кальцитом. Они интерпретируются как отложения коротких

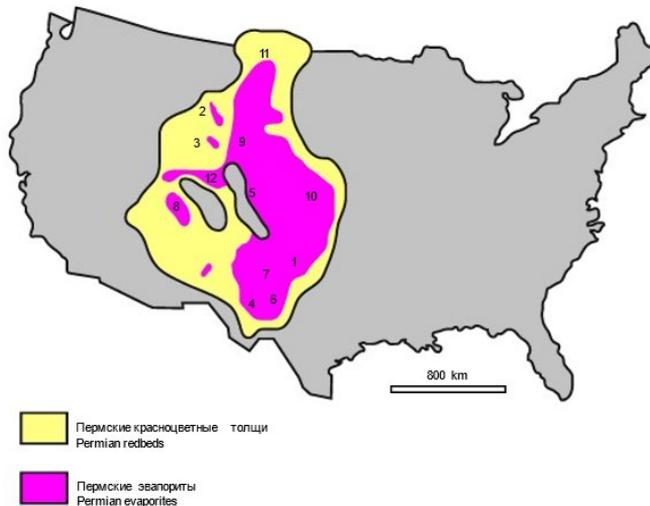


Рисунок 4. Распространение толщ красноцветов и эвапоритовых комплексов Пермского возраста, континентальная часть США [17, 18]

Figure 4. Distribution of redbeds and evaporite complexes of Permian age in the continental United States [17, 18]

Цифрами обозначены бассейны: 1 – Анадарко, 2 – Биг Хорн (Большой Рог), 3 – Грин Ривер (Зеленая Река), 4 – Делавэр, 5 – Денвер, 6 – Мидланд, 7 – Пало Дуро, 8 – Парадокс, 9 – Паудер (Пороховой), 10 – Салина, 11 – Уиллистон, 12 – Юинта. 1, 4, 6 и 7 объединены в Пермский мегабассейн.

Numbers indicate the following basins: 1 – Anadarko, 2 – Big Horn, 3 – Green River, 4 – Delaware, 5 – Denver, 6 – Midland, 7 – Palo Duro, 8 – Paradox, 9 – Powder, 10 – Salina, 11 – Williston, 12 – Uinta. 1, 4, 6 and 7 are grouped into the Permian mega-basin.

периодов максимального притока морской воды, когда эвапориты не выпадали или растворились. В пользу быстрого формирования солей в условиях мелководья также говорят кристаллические текстуры и ленточные прослои различных включений, интерпретируемые как годовые и/или сезонные циклы.

Свита Веллингтон (Wellington) и пачка Хатчинсон (Hutchinson), Канзас, США

Пачка солей Хатчинсон мощностью 110 м использовалась для различных промышленных целей более 50 лет. Галит добывали шахтным способом, а в искусственно созданных полостях хранили запасы природного газа и вещества, требовавшие пониженной влажности. Этот разрез достаточно хорошо изучался, начиная с 1960-х гг. XX в., в т.ч. с точки зрения седиментологии и состава морских вод позднепермского времени. Особое внимание различных специалистов Комиссии атомной энергетики² было связано с вопросами возможного захоронения высокоактивных отходов. Для оценки этого проекта в Канзасе было пробурено несколько скважин со сплошным отбором кернового материала. Помимо солей, в свите присутствуют пачки известняков Холленберг и Карлтон, расположенные ниже, и перекрывающая пачка Милан. Возраст свиты относится к раннепермскому (нижняя часть леонардской эпохи, 290–280 млн лет, что соответствует артинскому и кунгурскому ярусу).

В соли Хатчинсон выделяется до пяти различных лито-фациальных типов пород: основную массу составляет слоистый галит, в подчинённых количествах отмечаются аргиллиты, смятый (перемещённый) галит, переслаивания гипсов и ангидритов и смятые (перемещённые) гипсы и ангидриты [13]. В разрезе отсутствуют карбонаты и практически не выявлены растительные и/или животные остатки. Слоистый галит сложен чередованием толщиной от 0,3 до 1 см тёмно- и светло-серых разностей, изредка с розовыми прослоями из-за красноцветных глинистых включений. В глинистых разностях отмечаются самые разнообразные текстуры: интракластовые включения, слоистость восходящей ряби, различная косая и прерывистая волнистая слоистость, пластичные деформации, брекчии, текстуры отжатия вод и следы эрозии. В структуре слоистого галита присутствуют два типа кристаллов: более крупные донного роста, «шевронового» строения и более мелкие, кубической формы и хаотично ориентированные. Основную долю составляют разности донного роста. Отличительной чертой вторичных преобразований являются трещины, заполненные красным (из-за присутствия железа) галитом, которые пересекают все литологические разности Хатчинсон.

В этом разрезе выделяются три основные, связанные между собой, обстановки осадко-накопления: мелководье (или поверхностные рассолы), влажные и сухие илистые участки. Интервалы мелководья характеризуются периодической сменой периодов затопления, испарения и формирования пересыщенных растворов и усыхания с формированием систем трещин. Текстурные и седиментологические характеристики разреза указывают на его близость с современными обстановками солёных озер, солёных лагун и приливных равнин засушливых (аридных) областей. Условия формирования пачки солей Хатчинсон относят к типично континентальным и связывают с обширной прибрежной равниной [22].

**Палео-бассейны северной Европы.
Свита Цехштейн (поздняя пермь)**

В позднепермское время климат Земли относился к парниковому. Область северной Европы площадью около 600 тыс. км² была покрыта водами внутриконтинентального моря Цехштейн. Этот бассейн был относительно мелководным, с максимальной глубиной в центральной части до начала обособления и соленакопления не более 300 м. В структурном плане он делился на два вытянутых с запада на восток депоцентра, названными Северным и Южным Пермскими бассейнами. Разделявшая их последовательность положительных элементов Рингкёбинг-Фюн относится к средней части Северного моря. Литологические и стратиграфические сопоставления эвапоритовых разрезов обоих бассейнов указывает на их тесную взаимосвязь и высокую вероятность того, что цепочка сводов не препятствовала обмену рассолами. Основные структурно-тектонические элементы и палеогеографические зоны Южно-Пермского бассейна показаны на рис. 5.

В позднепермское время север Европы входил в состав суперконтинента Пангея и находился приблизительно на отметке 25–30 северной широты (рис. 1). Периодически ограниченное поступление вод Северного океана и располагавшегося на юго-востоке Тетиса привело к формированию толщи переслаивания сульфатных эвапоритов и галита с подчинёнными количествами горьких солей. До начала процессов просачивания морских вод, с которыми связывают отложения свиты Цехштейн, здесь в континентальных условиях засушливого климата накапливались разности золотых пород, плаи и вади (русел временных потоков), объединяемых в свиты Ротлейгенд-Висслигенд. В структурном плане эти области располагались в обширных, находящихся ниже уровня мирового океана депрессиях, которые были созданы на последних этапах

² Комиссия по атомной энергии США (United States Atomic Energy Commission) — правительственная организация, созданная в 1946 г. для содействия и контроля за развитием ядерной отрасли, в т.ч. научно-исследовательскими работами и хранением ядерных отходов.

вариссийского орогенеза (каменноугольный-раннепермский интервал). В периоды повышенного поступления воды временами пересыхающие и солёные озёра Ротлейгенда разливались, покрывая обширные территории (будущего) Южно-Пермского палеобассейна. После усыхания водоёмы достигли насыщения CaSO_4 , однако образования обширных пластов солей не происходило. В это время север Европы характеризовался развитием областей растяжения (пул-апарт) и рифтов, которые постепенно (к середине пермского времени) превращались в бассейны пассивных окраин.

С этими эпизодами связаны главные этапы плавного опускания территории, которые в сочетании с аридным климатом создали условия благоприятные для формирования мощных толщ эвапоритов, в т.ч. солей Цехштейн (P3), Мушелькалк (T2) и Кейпер (T3). На это накладывались процессы метосоматоза и гидротермальной активности, характерные для всего северо-запада Европы, свидетельства которой находят в многочисленных и разнообразных внутриформационных прожилках типа микроинтрузий.

Формирование пород Цехштейна относят к промежутку в 5–7 последних миллионов лет пермского периода. Их изучение оказалось более полным в Южно-Пермском бассейне, где в Голландии и на севере Германии поисковым бурением были выявлены многочисленные залежи природного газа. Кроме того, здесь, в континентальных областях в течение длительного времени шахтным способом осуществлялась добыча галита и калийных солей. Согласно разнообразным данным, позднепермское заполнение палеобассейна Цехштейна представляет собой классическое образование с концентрической зональностью и постепенным переходом от платформенных эвапоритов окраин к более глубоководным и слоистым разностям депоцентра.

Местными специалистами разрез Цехштейна на основании минералогии делился на последовательности, характеризующиеся постепенным переходом от условий меньшей солёности к большей. Здесь выделяют 4 основных (Z1–Z4) и 2 «остаточных», или неразвитых, цикла (Z5–Z6). Наиболее полный цикл начинается с трансгрессивных аргиллитов, которые сменяются карбонатами и завершаются мощной толщей эвапоритов преимущественно галита и ангидрита (рис. 6). С точки зрения циклостратиграфии, лежащие в основании трансгрессивные разности являются отложениями максимального стояния уровня

морья и служат маркерами для регионального сопоставления. Нижние три подразделения (Z1–Z3) являются бассейновыми, с морским питанием. В основании они содержат эвапоритовые карбонаты, которые формировались выпадением из вод нормальной морской солёности. Перекрывающие их ангидриды и соли связаны с постепенной осушкой солончаков, подпитываемых просачивающимися морскими водами и водами глубоких солёных озёр.

Классический циклостратиграфический анализ этого разреза оказался затруднителен из-за плохого качества (или отсутствия) протяжённых отражающих горизонтов внутри Цехштейна. Детальная интерпретация основывается на сопоставлении материалов обнажений, керн и каротажа. Переотложенные песчаники свиты Вейслегенд и конгломераты, собственно, свиты Цехштейн относятся к этапу начальной трансгрессии и отмечают границу цикла. Трансгрессивные комплексы сложены глубоководными карбонатными разностями свиты Муттерфлос, а перекрывающие их породы Купершифер являются толщей уплотнения. Большая часть мелководных карбонатов относится к комплексам высокого стояния уровня моря и отделена от тонкой кровельной части известняка Цехштейн карстовой поверхностью эрозии. Карбонатные разности сложены онколитами и строматолитами [26].

Каждый из эвапоритовых циклов представлен сложными чередованиями литофациальных разностей, связанными либо с колебаниями уровня моря, либо с климатическими изменениями внутри палеоконтинента. Практически во всех палеогеографических работах до 2000–2005 гг. предполагалось постоянное соединение с открытым океаном. Однако после появления результатов исследований по Мессинскому кризису солёности³ эта точка зрения претерпела значительные изменения. Максимальные эвстатические колебания уровня Мирового океана оценивались в первые 100 м, а в рассматриваемых эвапоритовых палеобассейнах падение воды достигало 500–1000 м [27]. Эвапоритовые разности максимальной мощности накапливались в центральных частях изолированного от океана бассейна. Эти области, с точки зрения циклостратиграфии, традиционно рассматриваются как глубоководные, однако текстуры соляных пород соответствуют солончаковым обстановкам с редкими, более глубокими разностями. Взаимосвязи литофациальных комплексов пород в таких разрезах пока плохо изучены и, очевидно,

³ **Мессинский кризис солёности** (Messinian salinity crisis) произошел в самом конце миоцена, когда Средиземное море высохло частично или почти полностью в результате закрытия связи с Атлантическим океаном (Гибралтарского пролива). Продолжался около 640 тыс. лет. Завершился открытием пролива и восстановлением связи с Атлантическим океаном с очень быстрым заполнением впадины водой. Кризисом это событие называют по причине очень резких и существенных изменений уровня воды, возникновением глубочайших – по разным данным до 5 км – впадин на суше, геологически почти мгновенным формированием мощных соляных толщ. Уникальность этих толщ в том, что они перекрывают и перекрываются глубоководными отложениями.

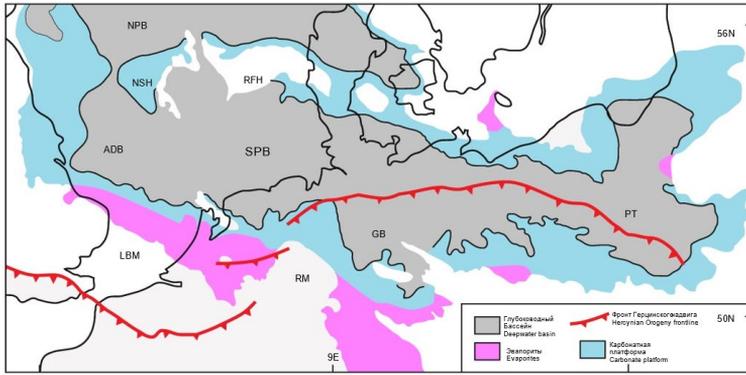


Рисунок 5. Основные структурно-тектонические элементы и палеогеографические зоны Южно-Пермского бассейна [23]

Figure 5. Main structural-tectonic elements and paleogeographic zones of the South Permian Basin [23]
 Буквами обозначены: ADB – Англо-Датский бассейн (Серебряный Рудник), GB – Немецкий бассейн, NPB – Северо-Пермский бассейн, NSH – Подъем Северного моря, PT – Польский Трог (бассейн), RFH – подъем Рингкобинг-Фин, RM – Рейнский массив, SPB – Южно-Пермский бассейн

Letters indicate: ADB – Anglo-Danish Basin (Silver Mine), GB – German Basin, NPB – North Permian Basin, NSH – North Sea Highrise, PT – Polish Trog (Basin), RFH Ringkøbing-Fin Highrise, RM – Rhine Massif, SPB – South Permian Basin.

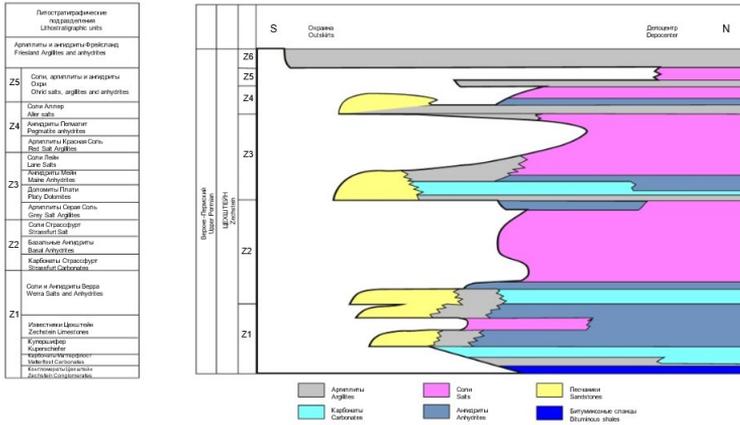


Рисунок 6. Стратиграфия Группы Цехштейна в Германии [23] и литологические подразделения [24]
Figure 6. Zechstein Group stratigraphy in Germany [23] and lithologic subdivisions [24]

не могут соответствовать классическим принципам морской стратиграфии [25].

Даже в разделяющих эвапоритовые комплексы карбонатных разностях, интерпретируемых как морские, значительные колебания уровня воды локального бассейна создают трудности при попытке «соединить их» с внешним источником. Сопоставление эвстатических моделей пермских эвапоритов Западного Техаса, обнажений Гренландии и разрезов Цехштейна указывает на их существенные различия [28]. Детальный циклостратиграфический анализ отложений изолированных бассейнов исключительно сложен, поскольку физико-химические условия влияли на скорости седиментации и форму эвапоритовых тел. Колебания уровня и концентрации рассолов могли создавать

или уничтожать пространство аккомодации и действовать совершенно независимо от глобальной эвстатике.

Проблема определения глубин соленакпления при формировании эвапоритовых толщ

Корректное определение глубин накопления солей имеет не только регионально-геологическое, но и совершенно практическое значение, поскольку отражается на результатах прогноза нефтегазоносности: они (глубины – прим. ред.) значительно, хотя и кратковременно, влияют на термобарические условия, в которых находятся все основные элементы углеводородных систем и, в первую очередь, нефтегазоматеринские толщи, что влияет

на результаты реконструкции процессов, в них происходящих.

Вопрос об условиях соленакопления возник очень давно. Долгое время основной считалась концепция К. Оксениуса, первооткрывателя минерала бишофит, обнаруженная в его монографии [29]. Согласно данной концепции, солёные толщи накапливались в условиях отшнурованных от моря лагун, тем не менее сохраняющих с ними связь через узкие проливы, через которые происходит поступление солёной воды, компенсирующей испарение. Соответственно, локальные удалённые бассейны рассматривались как потерявшие эту связь. Этой концепции противоречило мнение И. Вальтера, который обосновывал чисто континентальный генезис солей [30].

Однако появление сведений о том, что эвапориты в Приуральском бассейне, в частности, в районе Ишимбайских рифов, а затем и в Прикаспийской впадине залегают на глубоководных отложениях, привело к новому взгляду на эти процессы и появлению фундаментальной статьи А.Л. Яншина в 1961 г. [33], в которой были подробно проанализированы и подвергнуты критике упомянутые выше, а также иные гипотезы соленакопления, в т.ч. такие «экзотические», как биохимическая. В статье были сформулированы основные принципы, которые представлялись более всеобъемлющими:

Совершенно неправильно все солёные осадки называть лагунами, потому что в бассейнах типа лагун образовалась, по-видимому, лишь небольшая часть ископаемых солей. Подавляющая их часть формировалась в крупных и в ряде случаев глубоководных морских бассейнах, которые не существуют в современную эпоху.

Отложение мощных соляных толщ даже на платформах часто начиналось на глубинах во много сотен метров, а заканчивалось практически у поверхности.

Скорость накопления солей огромная (до 10 см в год) и во много (1000–10000) раз превышает скорость отложения большинства других осадочных пород.

Мощность соляных толщ никогда не соответствует величине конседиментационного прогибания, а всегда значительно превышает её. Все морские солеродные бассейны представляют собой типичный пример некомпенсированных депрессий, а отложение в них солей соответствует времени очень быстрой компенсации этих прогибов.

Главным фактором, влияющим на их образование, является сухость климата, а не высокая температура. При большой аридности климата солёные отложения могут образоваться даже при низких температурах, т.е. в очень высоких широтах.

В качестве объяснения распространённости концепций мелководного соленакопления

А. Л. Яншин указывал, что «мысль о том, что они могли быть достаточно глубоководными, высказывалась давно и неоднократно». Здесь он в первую очередь ссылается на работу Н.П. Герасимова 1940 г. [32]. «Однако, – продолжает автор, – эта мысль была опорочена неверными подсчётами, основанными на предположении, что осадка солей происходила в полностью изолированном бассейне за счёт испарения воды, первоначально имевшей нормальную морскую солёность. Исходя из этого предположения известный немецкий химик и геолог К.Г. Бишоф в 1864 г. в Германии определил глубину Цехштейнского соляного бассейна в 18600 м («Добыча каменной соли недалеко от Стассфурта»), а В.И. Николаев в 1937 г. – глубину кунгурского соляного бассейна Приуралья в 15000 м». Похожие расчеты делались и для Прикаспийского бассейна, правда, с гипотезой о многократном его выпаривании, которые показывали, что этот процесс должен был повториться более 20 раз, причём в очень короткий период времени.

Современные представления об условиях солеобразования в Прикаспийском мегабассейне вполне отвечают концепции, описанной А. Л. Яншиным. Как отмечают М.П. Антипов и Ю.А. Волож с соавторами, «в солеродных провинциях, аналогичных изученной нами Каспийской, началу соленакопления предшествует формирование глубоководной (-1,5–2,0 км) котловины, а к концу на месте котловины развивается предгорное аккумулятивное плато (+0,2–0,5 км)» [31]. Однако его тезис о том, что «мощности соляных толщ лишь в незначительной части отвечают конседиментационному пригибанию, а в основном отражают глубину бассейна, существовавшую к началу соленакопления», не подтверждается фактическими мощностями солей (в среднем около 4 км в центральной части) в Прикаспийской впадине, поскольку, как показано выше, глубина бассейна была в два с лишним раза меньше, чем мощность накопившихся солей. Однако и эта концепция потребовала расширения после того, как при изучении мессинских солей было установлено, что они не только подстилаются, но и перекрываются глубоководными осадками. Дело тут, вероятнее всего, в соотношении скоростей тех или иных геологических процессов: скорость соленакопления (по А.Л. Яншину, ссылка в [33]) – 10 см в год, при этом скорость выпаривания воды может достигать 10 м в год, а изостатические движения – «всплытие» земной коры как реакция на снятие водной нагрузки – не более 10 мм в год. Таким образом, при частичной или полной изоляции водного бассейна происходит быстрое снижение уровня воды, вызывающее отложение солей. Пополнение происходит за счёт частичной связи с Мировым океаном или поступления подземных вод, в случае Прикаспийской впадины высокоминерализованных. Масса

накопившихся солей такова, что подъёма земной коры либо не происходит совсем, либо он носит крайне ограниченный характер.

Выводы

Целью статьи являлся не подробный разбор условий соленакопления в каждом из рассмотренных бассейнах, а поиск тех условий, которые более всего соответствуют тому, что на данный момент известно о Прикаспийском мегабассейне. Условия формирования эвапоритовой части разреза играют важную роль в формировании и функционировании углеводородных систем, а, значит, обязаны учитываться при прогнозе нефтегазоносности.

Следует отметить, что большинство из рассмотренных комплексов имеют мелководно-морскую или континентальную природу. Некоторые из них (бассейн Амазонас или Цехштейн) перекрывают континентальные золотые отложения; все рассмотренные южноамериканские бассейны перекрываются красноцветными толщами флювиального и лагунного генезиса, равно как и кунгурские соли Прикаспийского бассейна. Свита Веллингтон и пачка Хатчинсон имеют мелководное происхождение. В то же время в европейских бассейнах (Орн, Цехштейн) эвапоритовые толщи, перекрывая континентальные или мелко-

водные осадки, в свою очередь, перекрываются отложениями, накопившимися в условиях крупного затопления. Наиболее близкими к прикаспийским выглядят особенности Пермского бассейна (Делавэр) – вероятное полное обособление, равно как и возможное формирование солей на дне глубокого палеобассейна. Этот бассейн также был одним из близких аналогов, выбранных на основе общегеологического анализа [1]. При этом здесь никак нельзя говорить о таком масштабном развитии галокемиза (в понимании Ю.А. Воложа [33], это процесс, происходящий, в отличие от соляной тектоники, по причине реологических свойств самой соли и веса перекрывающих осадков, а не провоцируемый движениями земной коры); более близким аналогом являются юрские соли свиты Луанн сопредельного бассейна Мексиканского залива. Таким образом, очевидным является вывод о том, что подбор прямого аналога Прикаспийского мегабассейна вряд ли реализуем в широком понимании; скорее, речь идет о поиске аналогов его развития на различных этапах. Это не значит, что принцип аналогий здесь неприменим – это значит только то, что его применение должно быть более ограниченным, а аналоги подбираться более тщательно.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Сынгаевский П.Е. – написание текста, аналитика, работа с источниками; Хафизов С.Ф. – работа с источниками, подготовка литературного обзора, подготовка

рисунков и табличных данных, редактирование рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Pavel E. Syngayevsky – writing, analyzing, working with sources; Sergey F. Khafizov – working with sources, preparing literature review, figures, and tabular data, and editing the manuscript.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исказиев К.О., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф.* Нефть на больших глубинах: сравнение нефтегазоносных бассейнов и перспективы поиска сверхглубоких залежей (бассейны Сычуань, Тарим, Пермский, Каннинг и Прикаспийский) // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2020. Том 2, №4(5). С. 3–20. doi: [10.54859/kjogi.202024](https://doi.org/10.54859/kjogi.202024).
2. *Blakey R.* Global Paleogeographic Map Series. [deeptimemaps.com](https://www.deeptimemaps.com), 2013.
3. *Scotese Ch.* PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates and the PaleoData Plotter program (PALEOMAP Project). www.scotese.com/ доступен на Youtube, 2016.
4. *Golonka J.* Paleozoic Paleoenvironment and Paleolithofacies Maps of Gondwana. Kraków : AGH University of Science and Technology Press, 2012.
5. *Golonka J., Porebski Sz.J., Waškowska A.* Silurian paleogeography in the framework of global plate tectonics // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2023. Vol. 622. doi: [10.1016/j.palaeo.2023.111597](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111597).

6. *Scotese Ch.R., Xu Ch.* Phanerozoic Paleoclimate: An Atlas of Lithologic Indicators of Climate. Edition: Concepts in Sedimentology and Paleontology. Boucot A.J., Nichols G.J., Ricketts B., editors. Tulsa: SEPM, 2013. 478 p.
7. *Evenick J.C.* Glimpses into Earth's history using a revised global sedimentary basin map // *Earth-Science Reviews*. 2021. Vol. 215. doi: [10.1016/j.earscirev.2021.103564](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103564).
8. *Warren J.K.* Evaporites: A Compendium. Berlin : Springer, 2016. 1854 p.
9. *Vaslet D., Le Nindre Y-M., Vachard D., et al.* The Permian-Triassic Khuff Formation of central Saudi Arabia // *GeoArabia*. 2005. Vol. 10, N 4. P. 77–134. doi: [10.2113/geoarabia100477](https://doi.org/10.2113/geoarabia100477).
10. *Ghasemi M., Kakemem U., Husinec A.* Automated approach to reservoir zonation: A case study from the Upper Permian Dalan (Khuff) carbonate ramp, Persian Gulf // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022. Vol. 97 doi: [10.1016/j.jngse.2021.104332](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104332).
11. *Wang T., Cao J., Xia L., et al.* Revised age of the Fengcheng Formation, Junggar Basin, China: Global implications for the late Paleozoic ice age // *Global and Planetary Change*. 2022. Vol. 208. doi: [10.1016/j.gloplacha.2021.103725](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103725).
12. *Andeskie A.S., Benison K.C.* A missing link in the mid-late Permian record of north-eastern Pangea: A sedimentological evaluation of the Permian Belfast Harbour Evaporite Formation of County Antrim, Northern Ireland // *Depositional Record*. 2021. Vol. 7, Issue 3. P. 451–469. doi: [10.1002/dep2.144](https://doi.org/10.1002/dep2.144).
13. *Andeskie A.S.* Evolution of extreme continental saline environments: a sedimentological investigation of Permo-Triassic redbeds and evaporites in Northern Ireland and Kansas : dissertation. West Virginia : West Virginia University, 2020. Available from: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/7782>.
14. *Hassaan M., Faleide J.E., Gabrielsen R.H., Tsikalas F.* Carboniferous graben structures, evaporite accumulations and tectonic inversion in the southeastern Norwegian Barents Sea // *Marine and Petroleum Geology*. 2020. Vol. 112. doi: [10.1016/j.marpetgeo.2019.104038](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104038).
15. *Gonzaga F.G., Goncalves F.T.T., Coutinho L.F.C.* Petroleum geology of the Amazonas Basin, Brazil: modeling of hydrocarbon generation and migration. In: Mello M.R., Katz B.J., editors. Petroleum systems of South Atlantic margins. Tulsa : AAPG Memoir 73, 2000. P. 159–178.
16. EIA, US Energy Information Administration. Permian Basin, Part 1. Wolfcamp, Bone Spring, Delaware Shale Plays of the Delaware Basin. Geology review. Washington : U.S. Department of Energy, 2020. 40 p.
17. *Warren J.K.* Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 2006. 1036 p.
18. USGS. Mineral commodity summaries 2023. Report. Reston, Virginia : National Minerals Information Center, 2023 Jan. 210 p.
19. EIA, US Energy Information Administration. Permian Basin, Part 2. Wolfcamp and Spraberry Shale Plays of the Midland Basin. Geology review. Washington : U.S. Department of Energy, 2022. 34 p.
20. *Kirkland D.W.* An explanation for the varves of the Castile evaporites (Upper Permian), Texas and New Mexico, USA // *Sedimentology*. 2003. Vol. 50, Issue 5. P. 899–920. doi: [10.1046/j.1365-3091.2003.00588.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00588.x).
21. *Hovorka S.D., Holt R.M., Powers D.W.* Depth indicators in Permian Basin evaporites // *Geological Society London Special Publications*. 2007. Vol. 285, N 1. P. 335–364. doi: [10.1144/SP285.19](https://doi.org/10.1144/SP285.19).
22. *Benison K.C., Zambito J.J., Knapp J.P.* Contrasting siliciclastic-evaporite strata and outcrop: An example from the Permian Nippewalla Group of Kansas, U.S.A. // *Journal of Sedimentary Research*. 2015. Vol. 85, N 6. P. 626–645. doi: [10.2110/jsr.2015.43](https://doi.org/10.2110/jsr.2015.43).
23. *Geluk M.C.* Permian Geology of the Netherlands. In: Wong Th.E., Blatjes D.A.J., de Jager J., editors. Geology of the Netherlands. Amsterdam : Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2007. P. 63–83.
24. *Tucker K.E., Chalcraft R.G.* Cyclicity in the Permian Queen Formation – U.S.M. Queen Field, Pecos County, Texas. In: Lomando A.J., Harris P.M., editors. Mixed Carbonate-Siliciclastic Sequences. Tulsa : SEPM (Society for Sedimentary Geology), 1991. P. 385–428.
25. *Balzer D.* Sangerhausen-Sulfat. In: Paul J., Heggemann H., editors. Stratigraphie von Deutschland XII. Zechstein. Stuttgart : Schweizerbart Science Publishers, 2020. P. 265–266. (In Deutsche).
26. *Gibson M.E.* Palaeoecology and Palaeoenvironments of the Late Permian Zechstein Sea and its Hinterlands: PhD thesis. Sheffield : University of Sheffield, 2020.
27. *Stemmerik L., Blinkenberg K.H., Gianotten I.P., et al.* Stratigraphic framework for Zechstein Carbonates on the Utsira High, Norwegian North Sea // *Journal of Petroleum Geology*. 2023. Vol. 46, N 3. P. 257–274. doi: [10.1111/jpg.12838](https://doi.org/10.1111/jpg.12838).
28. *Barnett H.G., Ireland M.T., Van der Land C.* Characterising the internal structural complexity of the Southern North Sea Zechstein Supergroup Evaporites // *Basin Research*. 2023. Vol. 35, Issue 5. P. 1651–1673. doi: [10.1111/bre.12768](https://doi.org/10.1111/bre.12768).
29. *Ochsenius C.* Die Bildung der Steinsalzlager und ihrer Mutterlaugensalze: unter spezieller Berücksichtigung der Flötze von Douglasshall in der egegn'schen Mulde. Halle : C.E.M.Pfeffer, 1877. 172 p. (In Deutsche).
30. *Walther J.* Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Forzeit. Berlin : Dietrich Reimer (Ernst Vohsen), 1900. (In Deutsche).
31. *Яншин А.П.* О глубине солеродных бассейнов и вопросах формирования соляных толщ // *Геология и геофизика*. 1961. №1. С. 3–15.
32. *Герасимов Н.П.* Геологическое строение Восточной нефтеносной области. М.-Л. : Издательство АН СССР, 1940. 140 с.
33. *Антипов М.П., Быкадоров В.А., Волож Ю.А., и др.* Стратиграфия и сейсмостратиграфия пермской эвапоритовой формации солеродной провинции Каспийского региона: Проблемы и решения // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2023. Т. 31, № 2. С. 40–58. doi: [10.31857/S0869592X23020011](https://doi.org/10.31857/S0869592X23020011).

REFERENCES

1. Iskazyev KO, Syngaevskiy PE, Khafizov SF. Ultra-deep Oil: Comparison of Oil and Gas Bearing Basins and Prospects for Exploration for Ultra-Deep Deposits (Sichuan, Tarim, Permian, Canning and Precaspian basins). *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2020;2(4):3–20. doi: [10.54859/kjogi.202024](https://doi.org/10.54859/kjogi.202024).
2. Blakey R. *Global Paleogeographic Map Series*. deeptimemaps.com, 2013.
3. Scotese C. *PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates and the PaleoData Plotter program (PALEOMAP Project)*. www.scotese.com/ available on Youtube, 2016.
4. Golonka J. Paleozoic Paleoenvironment and Paleolithofacies Maps of Gondwana. Kraków: AGH University of Science and Technology Press; 2012.
5. Golonka J, Porębski SJ, Waśkowska A. Silurian paleogeography in the framework of global plate tectonics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2023;622:111567. doi: [10.1016/j.palaeo.2023.111597](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111597).

6. Scotese CR, Xu C. *Phanerozoic Paleoclimate: An Atlas of Lithologic Indicators of Climate*. Edition: Concepts in Sedimentology and Paleontology. Boucot AJ, Nichols GJ, Ricketts B, editors. Tulsa: SEPM; 2013. 478 p.
7. Evenick JC. Glimpses into Earth's history using a revised global sedimentary basin map. *Earth-Science Reviews*. 2021;215:103564. doi: [10.1016/j.earscirev.2021.103564](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103564).
8. Warren JK. *Evaporites: A Compendium*. Berlin: Springer; 2016. 1854 p.
9. Vaslet D, Le Nindre Y-M, Vachard D, et al. The Permian-Triassic Khuff Formation of central Saudi Arabia. *GeoArabia*. 2005;10(4):77–134. doi: [10.2113/geoarabia100477](https://doi.org/10.2113/geoarabia100477).
10. Ghasemi M, Kakemem U, Husinec A. Automated approach to reservoir zonation: A case study from the Upper Permian Dalan (Khuff) carbonate ramp, Persian Gulf. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022;97:104332. doi: [10.1016/j.jngse.2021.104332](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104332).
11. Wang T, Cao J, Xia L, et al. Revised age of the Fengcheng Formation, Junggar Basin, China: Global implications for the late Paleozoic ice age. *Global and Planetary Change*. 2022;208:103725. doi: [10.1016/j.gloplacha.2021.103725](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103725).
12. Andeskie AS, Benison KC. A missing link in the mid-late Permian record of north-eastern Pangea: A sedimentological evaluation of the Permian Belfast Harbour Evaporite Formation of County Antrim, Northern Ireland. *Depositional Record*. 2021;7(3):451–469. doi: [10.1002/dep2.144](https://doi.org/10.1002/dep2.144).
13. Andeskie A.S. *Evolution of extreme continental saline environments: a sedimentological investigation of Permo-Triassic redbeds and evaporites in Northern Ireland and Kansas* [dissertation]. West Virginia : West Virginia University; 2020. Available from: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/7782>.
14. Hassaan M, Faleide JE, Gabrielsen RH, Tsikalas F. Carboniferous graben structures, evaporite accumulations and tectonic inversion in the southeastern Norwegian Barents Sea. *Marine and Petroleum Geology*. 2020;112:104038. doi: [10.1016/j.marpetgeo.2019.104038](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104038).
15. Gonzaga FG, Gonçalves FTT, Coutinho LFC. *Petroleum geology of the Amazonas Basin, Brazil: modeling of hydrocarbon generation and migration*. In: Mello MR, Katz BJ, editors. *Petroleum systems of South Atlantic margins*. Tulsa: AAPG Memoir 73; 2000. P. 159–178.
16. EIA, US Energy Information Administration. Permian Basin, Part 1. *Wolfcamp, Bone Spring, Delaware Shale Plays of the Delaware Basin*. *Geology review*. Washington : U.S. Department of Energy; 2020. 40 p.
17. Warren JK. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 2006. 1036 p.
18. USGS. Mineral commodity summaries 2023. Report. Reston, Virginia: National Minerals Information Center; 2023 Jan. 210 p.
19. EIA, US Energy Information Administration. Permian Basin, Part 2. *Wolfcamp and Spraberry Shale Plays of the Midland Basin*. *Geology review*. Washington: U.S. Department of Energy; 2022. 34 p.
20. Kirkland DW. An explanation for the varves of the Castile evaporites (Upper Permian), Texas and New Mexico, USA. *Sedimentology*. 2003;50(5):899–920. doi: [10.1046/j.1365-3091.2003.00588.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00588.x).
21. Hovorka SD, Holt RM, Powers DW. Depth indicators in Permian Basin evaporites. *Geological Society London Special Publications*. 2007;285(1):335–364. doi: [10.1144/SP285.19](https://doi.org/10.1144/SP285.19).
22. Benison KC, Zambito JJ, Knapp JP. Contrasting siliciclastic-evaporite strata and outcrop: An example from the Permian Nippewalla Group of Kansas, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*. 2015;85(6):626–645. doi: [10.2110/jsr.2015.43](https://doi.org/10.2110/jsr.2015.43).
23. Geluk MC. Permian Geology of the Netherlands. In: Wong Th.E., Blatjes D.A.J., de Jager J., editors. *Geology of the Netherlands*. Amsterdam : Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences; 2007. P. 63–83.
24. Tucker KE, Chalcraft RG. *Cyclicity in the Permian Queen Formation – U.S.M. Queen Field, Pecos County, Texas*. In: Lomando A.J., Harris P.M., editors. *Mixed Carbonate-Siliciclastic Sequences*. Tulsa: SEPM (Society for Sedimentary Geology); 1991. P. 385–428.
25. Balzer D. *Sangerhausen-Sulfat*. In: Paul J., Heggemann H., editors. *Stratigraphie von Deutschland XII. Zechstein*. Stuttgart : Schweizerbart Science Publishers; 2020. P. 265–266. (In Deutsche).
26. Gibson ME. *Palaeoecology and Palaeoenvironments of the Late Permian Zechstein Sea and its Hinterlands*: PhD thesis. Sheffield: University of Sheffield; 2020.
27. Stemmerik L, Blinkenberg KH, Gianothen IP, et al. Stratigraphic framework for Zechstein Carbonates on the Utsira High, Norwegian North Sea. *Journal of Petroleum Geology*. 2023;46(3):257–274. doi: [10.1111/jpg.12838](https://doi.org/10.1111/jpg.12838).
28. Barnett HG, Ireland MT, Van der Land C. Characterising the internal structural complexity of the Southern North Sea Zechstein Supergroup Evaporites. *Basin Research*. 2023;35(5):1651–1673. doi: [10.1111/bre.12768](https://doi.org/10.1111/bre.12768).
29. Ochsenius C. *Die Bildung der Steinsalzlager und ihrer Mutterlaugensalze: unter specieller Berücksichtigung der Flötze von Douglasshall in der egehn'schen Mulde*. Halle: C.E.M.Pfeffer; 1877. 172 p. (In Deutsche).
30. Walther J. *Das-Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Forzeit*. Berlin: Dietrich Reimer (Ernst Vohsen); 1900. (In Deutsche).
31. Yanshin AL. O glubine solerodnykh basseynov i voprosakh formirovannaya solyanykh tolshch. *Geologiya i geofizika*. 1961;1:3–15. (In Russ).
32. Gerasimov NP. *Geologicheskoe stroenie Vostochnoi neftenosnoi oblasti*. M.-L.: Izdatel'stvo AN SSSR; 1940. 140 p. (In Russ).
33. Antipov MP, Bykadorov VA, Volozh YA, et al. Stratigraphy and Seismostratigraphy of the Permian Evaporite Formation in the Salt-Producing Province of the Caspian Region: Problems and Solutions. *Stratigraphy. Geological correlation*. 2023;31(2):40–58. doi: [10.31857/S0869592X23020011](https://doi.org/10.31857/S0869592X23020011).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сынгаевский Павел Евгеньевич

канд. геол.-мин. наук

ORCID [0009-0000-5035-1202](https://orcid.org/0009-0000-5035-1202)

e-mail: pavel.syngaevsky@chevron.com.

***Хафизов Сергей Фаизович**

докт. геол.-мин. наук, профессор

ORCID [0000-0003-1426-7649](https://orcid.org/0000-0003-1426-7649)

e-mail: khafizov@gubkin.ru.

AUTHORS' INFO

Pavel E. Syngaevsky

Cand. Sc. (Geology and Mineralogy)

ORCID [0009-0000-5035-1202](https://orcid.org/0009-0000-5035-1202)

e-mail: pavel.syngaevsky@chevron.com.

***Sergey F. Khafizov**

Doct. Sc. (Geology and Mineralogy), professor

ORCID [0000-0003-1426-7649](https://orcid.org/0000-0003-1426-7649)

e-mail: khafizov@gubkin.ru.

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding Author