

УДК 553.98

## НЕФТЬ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ. ЗАЛЕЖИ ОФФШОРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕКСИКАНСКОГО ЗАЛИВА

К.О. Исказиев, П.Е. Сынгаевский, С.Ф. Хафизов

Данная статья продолжает серию обзоров нефтегазоносных бассейнов мира, где происходят активная разведка и освоение залежей углеводородов в сверхглубоких (6 км+) горизонтах, как возможных аналогов проектов в Прикаспийском мегабассейне, в первую очередь, проекта Евразия. Мексиканский залив представляет огромный интерес, поскольку этот регион за столь длительную историю своего освоения очень хорошо разработан и, соответственно, дает возможность анализировать огромный объем собранных за это время данных.

Мексиканский залив включает в себя глубоководные, шельфовые и прибрежные части трех стран – США, Мексики и Кубы, и является одной из важнейших нефтегазоносных провинций мира. Его отложения представлены различными комплексами – от средней юры до современных осадков, с суммарной мощностью 14000 м и более. Разведка углеводородов продолжается здесь почти 100 лет. За это время были разработаны и успешно применялись различные новейшие технологии, такие как прогноз аномально высокого пластового давления, циклостратиграфия и сейсмофациальный анализ, характеристика низкоомных продуктивных коллекторов и поиск сверхглубоких залежей углеводородов.

Из всего многообразия объектов, осваиваемых в заливе, в контексте исследования залежей на больших глубинах основной интерес и возможные ассоциации с Прикаспийским мегабассейном представляют собой отложения свиты Норфлет верхнеюрского возраста, рассмотрению которой посвящена основная часть этой статьи. Разумеется, речь не идет о прямом сопоставлении, в частности, золотое происхождение части разреза существенно отличает этот объект. Тем не менее, по мнению авторов, его изучение, а также понимание того, как успешный проект по его освоению реализуется прямо на наших глазах, может дать много важной информации и для работы в глубоких горизонтах Прикаспия.

Статья состоит из двух частей. В первой рассматриваются геологическая история формирования бассейна Мексиканского залива, особенности глубокозалегающего продуктивного комплекса свиты Норфлет. Во второй части приведены сведения об истории разведки продуктивного комплекса Норфлет, характеристика основных открытий, а также перспективы открытий новых сверхглубоких месторождений в свите Норфлет в пределах Мексиканского залива (сектора США и Мексики). Анализ истории освоения этого комплекса силами глобального «царока», компании Шелл, имеет очень важное значение, как далеко не единственный, но один из сценариев освоения глубокозалегающих горизонтов в других нефтегазоносных бассейнах, в т.ч. Прикаспийском. Глобальные компании (International Oil Companies) в состоянии мобилизовать необходимые ресурсы и технологии для эффективного решения этой задачи.

**Ключевые слова:** Мексиканский залив, Прикаспийский мегабассейн, осадочный бассейн.

### История формирования бассейна Мексиканского залива

Тектоническая история Мексиканского залива (далее – Залив) началась в мезозойскую эру. Существовавший в то время суперконтинент Пангея разделился в результате средне- и верхнетриасового рифтогенеза, происходившего между современной Северной Америкой и блоком Юкатан. Сдвиг (будущего) полуострова

на юго-восток создал пространство аккумуляции для формирования бассейна (Blakey, 2013 [1]). В среднеюрское и нижнемеловое время происходит дальнейшее расширение океанического дна, поворот Юкатана и в результате раскрытие центральной части Мексиканского залива в Атлантический океан (рис. 1, 2). В течение мелового периода эта территория переходит в дрифтовую фазу, с

тектонической стабильностью в условиях постоянного погружения. К концу мезозоя здесь сформировался огромный осадочный бассейн.

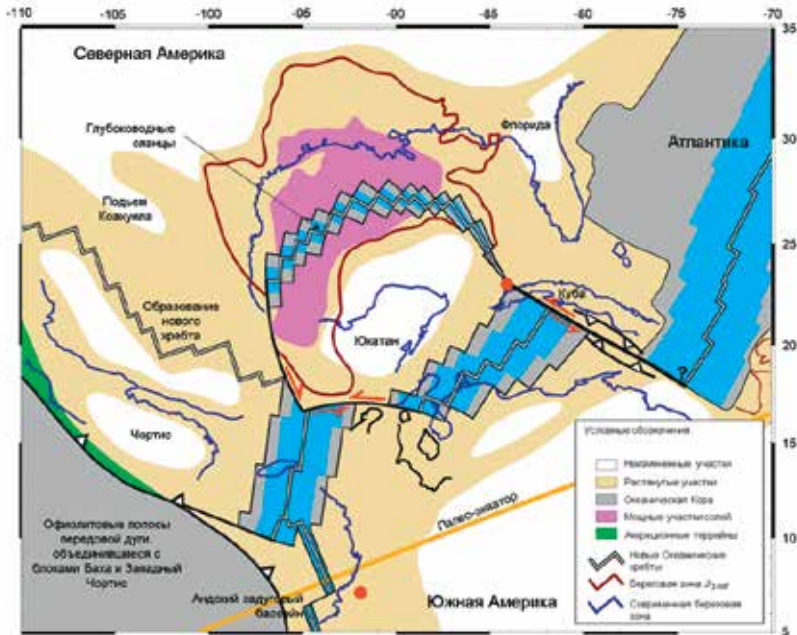


Рисунок 1. Тектоническая реконструкция формирования бассейна Мексиканского залива (Blakey, 2013 [1])

Дополнительно обозначены (красным): точки (полюса) – ротации блоков; стрелки – тектонические трансгрессии, вызванные изменениями направления раздвигов в Атлантике.

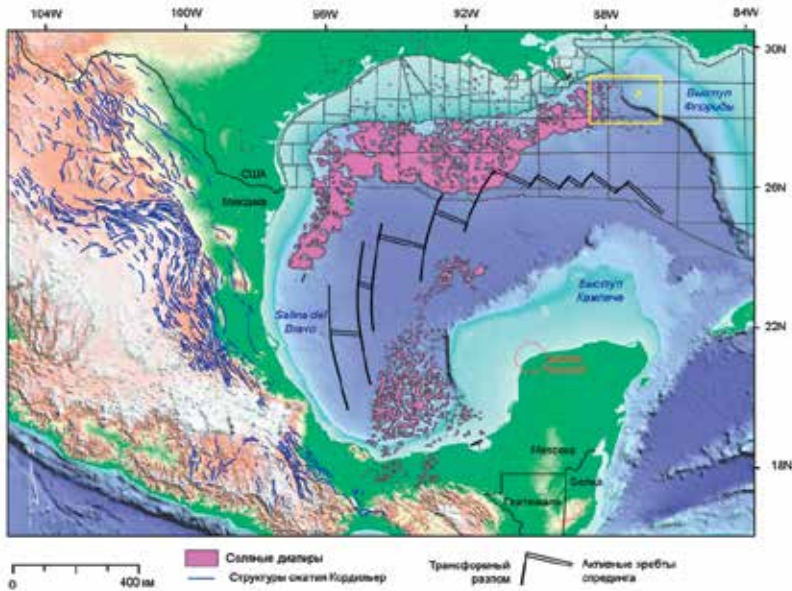


Рисунок 2. Основные структурно-тектонические элементы западной и центральной частей Мексиканского Залива (по материалам M.Hudec [2–4] и Comisión Nacional de Hidrocarburos, 2015 [5])

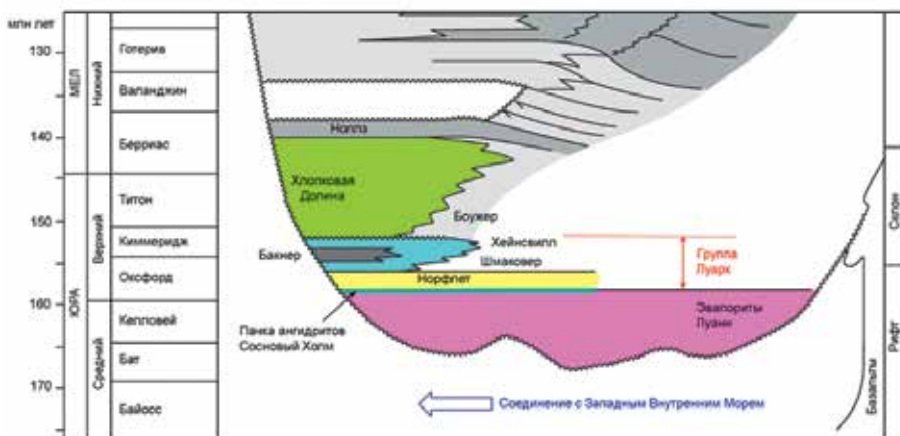
ТР – разлом горизонтального скола

Обозначения: А – положение участка палеогеографической реконструкции (на рис. 5)

В кайнозое этот бассейн развивался как пассивная континентальная окраина. В период, начиная с палеоцена и по средний эоцен, на окружающих его континентальных участках происходили процессы орогенеза Ларамид и Сьерра Мадре Ориентал. Затем в среднем и верхнем эоцене начались сложные процессы отжимания соляных масс и связанной с этим складчатости. Активная соляная тектоника продолжалась до середины, а местами и до окончания миоцена, сформировав исключительно сложную УВ-систему.

Согласно палеогеографическим реконструкциям, в верхнетриасовое и среднеюрское время здесь преобладали мелководно-морские условия ограниченного бассейна, в котором откладывались эвапориты, карбонаты, вулканокластика и соли Луанн (Blakey, 2013 и 2017 [1, 6], Scotese,

2001 [7]). В течение 10 млн лет в заливе была отложена толща галита мощностью до 4000 м, которая заполнила весь рельеф нижележащих пород. В оксфордское время ей на смену пришли сравнительно маломощные, но широко распространённые терригенные осадки прибрежно-эолового типа, выделяемые на севере залива в свиту Норфлет. Несмотря на ярко выраженную разницу в литофациальных комплексах, Норфлет может рассматриваться как трансгрессивная покрывка единого (преимущественно эвапоритового) цикла Луанн. В его основании часто присутствует слой ангидрита, выделяемый в отдельную пачку – Сосновый Холм, или глинистые разности (рис. 3). Продолжившаяся в Оксфорде трансгрессия позволила в пределах стабильной окраины палеобассейна, образоваться первому карбонатному комплексу (Galloway, 2008 [8]).



**Рисунок 3. Фрагмент общей стратиграфической схемы Мезозоя севера Мексиканского залива (Galloway, 2008 [8])**

*Несмотря на литологические отличия, контакт между Луанн и Норфлет считается «неясным»: на границе выделяется пачка ангидритов, которая в сторону депоцентров замещается на аргиллиты. Залегание может быть согласным или с угловым несогласием, а обе свиты объединены в один седиментационный цикл.*

В верхней юре начинает сказываться влияние океана, а центральная часть достигает глубин в 2000 м. Соответственно, преобладает глубоководно-морская седиментация с некоторым проградационным заполнением обломочным материалом в северной части. К меловому периоду максимальные глубины палеобассейна доходили до 4000–5000 м, что обусловило отложение глубоководных карбонатных разностей. 3 подразделения – Шмаквер, Бакнер и Гилмер – образуют осадочный цикл длительностью в 5 млн лет, ограни-

ченный в кровле и подошве трансгрессивными поверхностями (рис. 3).

В кайнозое с севера, запада и северо-запада началось поступление аллювиальных отложений, связанное с различными поднятиями на континенте. Ларамидские горообразовательные процессы положили конец формированию карбонатных разностей, и тип осадконакопления сменился на преимущественно обломочный. Отложения нижней части свиты Уилкоккс (верхний палеоцен) были первыми поступлениями грубообломочного материала с запада и северо-запада. К на-

чалу эоцена здесь происходит обширная трансгрессия, которая приводит к формированию огромного глинистого интервала (Galloway, 2000 [9]). Верхняя часть (под-свита) Уилкоккс относится к началу эоцена и характеризуется формированием обширной аллювиально-прибрежной равнины с турбидитными комплексами в западной части. Средний и верхний эоцен характеризуются регрессивными комплексами, связанными с отжиманием солей.

Олигоцен связан с массивным привносом осадков и, в частности, формированием на западе и северо-западе песчаных проградационных последовательностей свиты Фрио (верхний олигоцен). К миоцену источники сноса грубообломочного материала сместились в северном направлении, а основные депоцентры – на восток.

Очень важно также рассмотреть основные нефтематеринские породы, с которыми связана продуктивность разреза. В отложениях Мексиканского залива выделяется несколько потенциально нефтематеринских толщ, из которых основными считают отложения титонского возраста. Эти комплексы сформировались в условиях глубоководного моря и характеризуются присутствием керогена второго типа (II и II-S). Согласно данным геохимии, содержание органического углерода в породах превышает 4% (вес), а водородный индекс – более 500 мг УВ/г органики. УВ-систему северной части относят к смешанному типу, полагая, что большая часть углеводородов – верхнеюрского возраста (Weimer, 2017 [10]).

Возраст большей части глубоких и сверхглубоких залежей этой провинции – от верхнеюрского (свита Норфлет), верхнепалеоценового-нижнеолигоценового (свита Уилкоккс), олигоцен (свита Фрио) и неоген. Песчаники Норфлет и Уилкоккс считаются наиболее важными объектами, т.к. характеризуются повышенными фильтрационно-емкостными свойствами (далее – ФЕС): пористостью от 22% до 30% и абсолютными проницаемостями до 950 мД. В фациальном плане продуктивные коллекторы варьируют от прибрежно-морских, эоловых разностей (верхняя юра) до глубоководных турбидитов (миоцен).

Далее подробно рассматриваются геологическое строение свиты Норфлет и связанный с ней успешный проект по освоению сверхглубоких нефтяных месторождений.

### **Свита Норфлет (комплекс верхнеюрского возраста)**

УВ-система Норфлет является уникальной по двум причинам: лито-стратиграфическое положение и вклад в успешное освоение сверхглубоких комплексов прибрежной и глубоководной частей Мексиканского залива. Вместе с эвапоритами Луанн и обогащенными органикой карбонатно-глинистыми разностями свиты Шмаковер она формирует «перевернутую» последовательность типа «покрышка – коллектор – генерирующая толща». Свита залегает в основании осадочного комплекса пород и подстилается мощной соленосной толщей, поэтому единственный путь для поступления в неё УВ – нисходящая миграция. Анализ нефтей из крупнейшего м. Аппоматокс показал высокую степень родства с органикой нефтематеринских интервалов перекрывающей её свиты Шмаковер (Godo, 2017 [11]).

Породы свиты Норфлет не выходят на поверхность, и её изучение основывалось на данных керна, коротажа, различных дистанционных методов и современных аналогов. Тем не менее в результате этих работ был сделан успешный прогноз о развитии высокопродуктивных коллекторов гранулярного типа в сверхглубоких разрезах сначала береговой полосы (залив Мобил), а затем и глубоководной части (каньон ДеСото).

Первая скважина вскрыла эти отложения ещё в 1935 г. и была выделена в виде собственного циклостратиграфического подразделения (свиты) в 1947 г. Потребовалось ещё 20 лет, прежде чем компания Shell, открыв месторождение Пеллахачи, обнаружила в этих песчаниках первую нефть (Godo, 2017 [11]). Этот успех не остался незамеченным, и в период с 1967 по 1979 гг. были найдены многочисленные залежи в штатах Алабама (14 залежей), Техас (2 залежи), Флорида (2 залежи) и Миссиссипи (15 залежей). Тренд континентальных открытий продолжился и в Мексиканском заливе, где сначала в прибрежной полосе, а затем и в глубоководной зоне были сделаны сверхглубокие коммерческие открытия (табл. 1, рис. 4).

Результаты бурения на объекты Норфлет также позволили пересмотреть и повысить перспективность других расположенных на больших глубинах (>6000 м) континентальных комплексов: Наггет (США), Ротлейгенс (Европа) и Унайза (Ближний Восток).



Таблица 1. Распределение пластовых давлений и температур УВ-системы Норфлетт-Шмаквер в заливе Мобил Бэй и каньоне Де Сото (Мексиканский залив)

Объект	Блок (MMS)	Дата окончания бурения	Оператор	Скважина (UWI)	Глубина воды, м	Забой, м	Свита Норфлетт		
							Температура, С°	Давление, МПа	Результаты
Шилох	DS 269	09/09/2003	Шелл	608234000601	2288,6	7282,5	123,0	111,4	нефть и остаточная нефть
Виксбург – В	DS 353	09/08/2007	Шелл	608234001401	2272,8	7553,8	166,1	119,2	нефть
Фредриксбург	DS 486	08/08/2008	Шелл	608234001500	2377,3	7484,9	147,8	113,8	нет проявлений УВ
Антиетам	DS 268	08/15/2009	Шелл	608234001702	2255,4	7325,2	157,2	116,2	нефть и остаточная нефть
Аппоматокс	МС 392	03/12/2010	Шелл	608174117203	2199,6	8176,5	137,8	125,0	нефть
Петербург	DS 529	05/02/2013	Шелл	608234002100	2324,0	8131,1	83,9	128,2	нет проявлений УВ
Виксбург – А	МС 393	05/17/2013	Шелл	608174125300	2246,6	7664,1	151,1	119,8	нефть
Хищник	DS 535	05/18/2013	Анадарко	608234002000	2489,8	6746,4	110,8	88,2	нет проявлений УВ
Коринф	МС 393	09/10/2013	Шелл	608174125302	2247,8	8027,4	162,2	122,9	остаточная нефть
Сакэ	DS 726	09/19/2013	ВНР	608234002400	1089,6	5596,5	86,7	67,3	нет проявлений УВ
Мадагаскар	DS 757	12/14/2013	Маратон	608234002500	2557,5	6902,2	103,9	99,1	нет проявлений УВ
Рыба-меч	DS 843	12/23/2013	Шелл	608234002200	2586,7	7485,5	123,9	83,6	нет проявлений УВ
Ридберг	МС 525	06/03/2014	Шелл	608174128000	2272,5	8037,5	151,7	125,6	нефть
Титан	DS 178	09/05/2014	Мёрфи	608234002702	1999,4	7420,9	138,9	120,5	нефть и остаточная нефть
Геттисбург	DS 398	11/28/2014	Шелл	608234002800	2310,0	7562,9	121,0	116,5	нефть
Персей	DS 231	12/14/2014	Статойл	608234002600	1370,0	6985,1	114,0	97,7	нет проявлений УВ
Форт Самтер	DS 566	02/01/2016	Шелл	608174131801	2138,1	8688,2	163,0	140,4	нефть
Лизбург	МС 475	05/17/2016	Шелл	608174132700	2008,5	8364,8	121,1	140,7	остаточная нефть
Баллимор	МС 607	12/16/2017	Шеврон	608174135802	1992,1	8897,9	182,2	147,0	нефть
Мобил Бэй	BLK 112	01/27/1999	Эксон	1297203620000	10,7	6664,1	193,3	94,1	газ и конденсат
Фарватер	BLK 132	04/30/1987	Шелл	1297202810000	0,2	6970,78	197,8	102,5	газ (API = 0,64)

Примечание: жирным шрифтом выделены данные по результатам испытаний



Рисунок 4. Общая схема областей Мексиканского залива и батиметрия (контуры – в футах), по данным MMS, 2017 г. Положение нефтяных месторождений глубоких комплексов

### Норфлет. Общая характеристика

Песчаники свиты Норфлет были сформированы в верхнеюрское (оксфордское) время, преимущественно в условиях обширного эолового побережья соляной (солончаковой) равнины штатов Миссиссипи, Алабама, Флорида и залива Мобил. Литофациальные и стратиграфические аналоги также описываются на северном побережье полуострова Юкатан в Мексике (Snedden, 2020 [12]). После окончания образования солей участки коры дна залива продолжали свое движение еще 7–12 млн лет, увеличив ширину бассейна в центральной части на расстояние от 100 до 250 км (Godo, 2019 [13]). Это увеличение постепенно сходило на нет к краевым частям, где соляные массы «перетекали» по горизонтали, заполняя расширяющийся бассейн. По мере продвижения соли в сторону глубоководья кромка воды в начале образования свиты Норфлет перемещалась в сторону моря; выступающая на поверхность соляная равнина послужила основой для отложения литофаций смыва<sup>1</sup> и эоловых комплексов.

Изначально сдвиг и соскальзывание отложений свиты Норфлет по склону связывались с избыточной нагрузкой на нижележащую соль, которая под давлением начинала «течь». Такие явления описывались в разрезах штатов Алабама и Миссиссипи, а также в бассейне Восточного

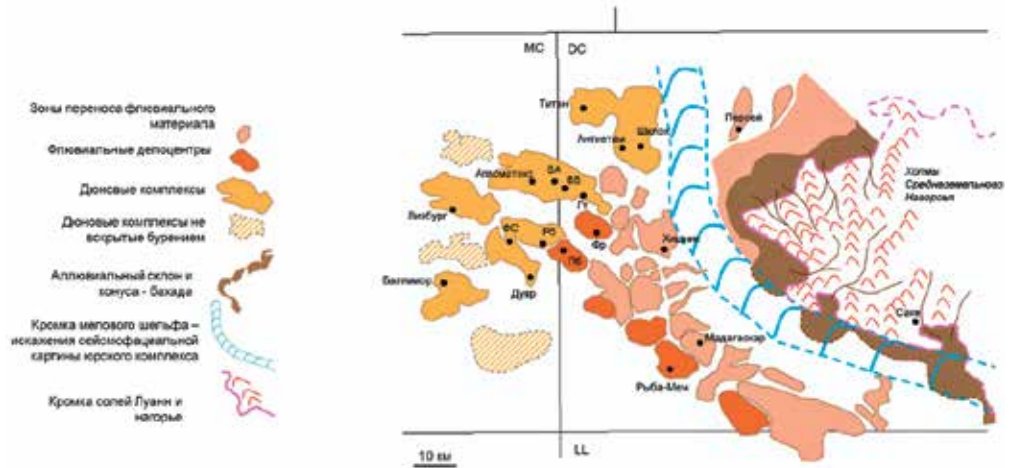
Техаса, где для начала процессов ремобилизации соли потребовалось не более 600 м осадка (Hudec, 2013 [2, 3]). Региональное погружение бассейна было на запад, его осложняло локальное поднятие Среднеземельного нагорья, которое служило источником различного обломочного материала: метаморфических комплексов палеозоя и мезозойских – вулканических (рис. 5). Вероятно, его присутствие также сказывалось на направлении вдольбереговых ветров, которые формировали эоловые комплексы.

Структурная ось нагорья погружалась в западном направлении, разделяя участки трех минибассейнов. Большие блоки осадочных пород, формировавшиеся в пределах возвышений, отламывались и соскальзывали вниз по склону, образуя олистролиты. Начало таких оползаний относится ко времени завершения отложения нижней части свиты Шмаковер, и оно продолжалось в меловое время. Размеры оползаний составляли от 2–40 км в длину и 2–15 км в ширину. Во время формирования отложений свиты Норфлет происходила дифференциация в вертикальной нагрузке, создавая иногда даже на небольших участках заполненные песчаным материалом депозиты, окруженные поднятиями. На некоторых участках смещенная соль формировала «стены», блокирующие перемещение песчаного материала или

<sup>1</sup> В оригинале используется термин «флювиально-зандровый» (от термина «зандр» (исп. sandur — буквально «песочник», от sand — «песок») — пологая волнистая равнина, расположенная перед внешним краем конечных морен — «wiki»), который рекомендован к применению при описании ледниковых осадков.

частично перенаправляющие его перенос. Такая ситуация описывается, вероятно, в самом значимом открытии этого тренда

– сверхглубокого месторождения Аппоматокс.



**Рисунок 5. Общая палеогеография верхнеюрского интервала свиты Норфлет на глубоководном участке Мексиканского залива и положение скважин (по материалам Godo, 2017 [11], 2019 [12] и ВОЕМ, 2020 [14])**

Дополнительно обозначены:

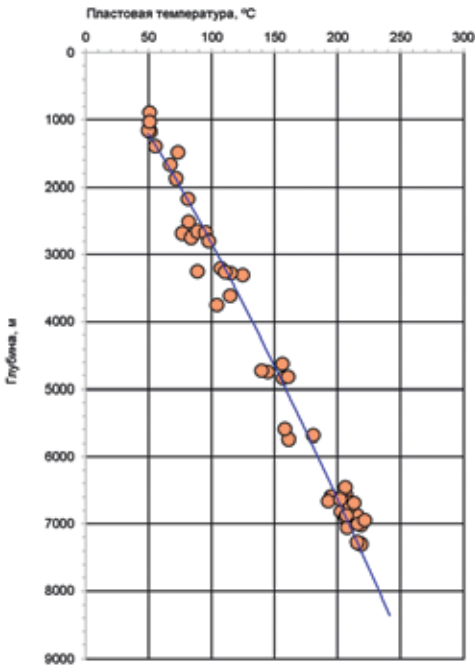
- |                      |                      |                           |  |
|----------------------|----------------------|---------------------------|--|
| – скважины:          |                      | – блоки:                  |  |
| • BA – Виксбург «А»; | • PB – Рутберг;      | • DC – каньон де Сото;    |  |
| • BB – Виксбург «В»; | • ФР – Фредриксбург; | • LL – Ллойд;             |  |
| • Gt – Геттисбург;   | • FC – Форт Самтер;  | • MC – каньон Миссиссипи. |  |
| • PB – Питерсбург;   |                      |                           |  |

Красной стрелкой показано теоретическое направление ветров, огибавших подъем нагорья и формирующих эоловые (дюнные) комплексы.

Для обозначения таких явлений, происходящих на начальном этапе дифференциального уплотнения, был предложен термин «барьеры вязкости», которые могли служить в дальнейшем начальными участками латерального соскальзывания (Ings, 2010 [15]). Дополнительная нагрузка осадков, скопившихся перед таким барьером, приводила к усилению дифференциации. Согласно расчётам, при соблюдении оптимальных условий для формирования минибассейна, связанного с топорельефом, вызванным подвижками соляного слоя, понадобилось всего 50 тыс. лет

(Godo, 2019 [13]). Такие гряды могли оказывать влияние на предпочтительное распределение грубозернистого материала как в подводных условиях (меняя волны и течения), так и при их выходе на поверхность (ветер).

Глубокие залежи свиты Норфлет могли получать сгенерированные вышележащими слоями УВ только при условии сохранения проницаемости. На основании анализа скважин каньонов Де Сото и Миссиссипи был сделан вывод, что во всех «сухих» структурах кероген свиты Шмаковер не дошел до стадии зрелости (табл. 1). Это совпадает с распределением современных пластовых температур и давлений, которые значительно выше в продуктивных разрезах (рис. 6).



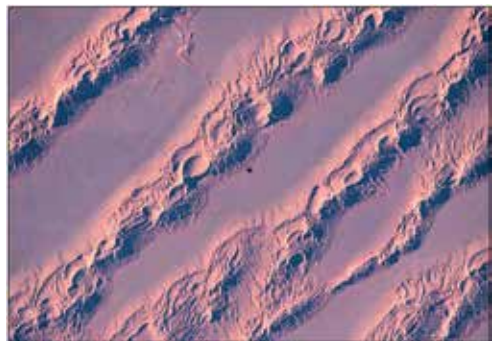
**Рисунок 6. Повышение пластовых температур песчаников Норфлет с глубиной. Данные континентальной части штата Алабамы и офшорных блоков: пролив Миссиссипи, Виоска Нол и залив Мобил (Nagihara, 2015 [16])**

В глубоко погруженном эоловом комплексе эффективная проницаемость, обеспечивающая миграцию УВ, связана исключительно с литофациями дюн. Причем лучшие её распределения отмечаются для более континентальных, «сухих» и высокоамплитудных форм, расположенных выше уровня воды. Наиболее перспективными являются участки дюнового комплекса, характеризующегося поступлением обильного обломочного материала и одновременно низкой скоростью погружения для обеспечения лучшей сортировки материала и наложения нескольких полос дюн. Наличие слишком большого пространства между ограничивающими грядами приводит к миграции дюн и смещению верхней, наиболее проницаемой части, а излишне быстрое погружение не дает возможность осуществить сортировку обломочного материала.

Периодический смыв и перенос глинистых частиц с поверхностной части дюны приводит к характерному глинистому покрытию песчаных зерен, которое в

дальнейшем предохраняет породу от диагенетических изменений (цементации). Таким образом, и «сухие», и более влажные дюны могут сохранять коллекторские свойства своих песчаников; но в случаях с отложениями выше уровня пластовых вод появляется дополнительная возможность наложения верхних частей и образования более мощного интервала с улучшенными ФЕС (Kocurek, 1993 [17]).

Мощность песчаных разностей свиты меняется в зависимости от рельефа – присутствия выступов, с которых поступали вода и обломочный материал, и преобладающего направления ветров, осуществлявших переотложение, окатку и сортировку частиц. Эоловые песчаные комплексы характеризуются весьма сложным строением, и для их детального анализа часто привлекают современные аналогии. Узкая вытянутая морфология песчаных гряд, а также группировка различных типов пород в литофациальные комплексы хорошо видна на снимках Сахары (Алжир) и побережья Намибии, сделанных НАСА (рис. 7, 8) [18, 19]. Они удивительным образом соответствуют положению детально закартированных продуктивных песчаников Норфлет на побережье Алабамы (рис. 9).



**Рисунок 7. Фотография фрагмента пустыни Сахара – участок Большого Азиатского Эрга в Алжире**

Ширина отдельных дюновых полос около 1500 м, высота – до 150 м. Эти сложные песчаные гряды состоят из элементов более мелкого ранга: звездных дюн (барханов?) и вытянутых продольных и поперечных сеифов. Различные морфологические формы связаны с направлением ветров, преимущественно на юг на данном участке.

Фото ISS046-E-48626 сделано Джастином Уилкинсоном (НАСА) в 2016 г. Координаты центра фотографии широта: 28.00N и долгота: 6.60 E.





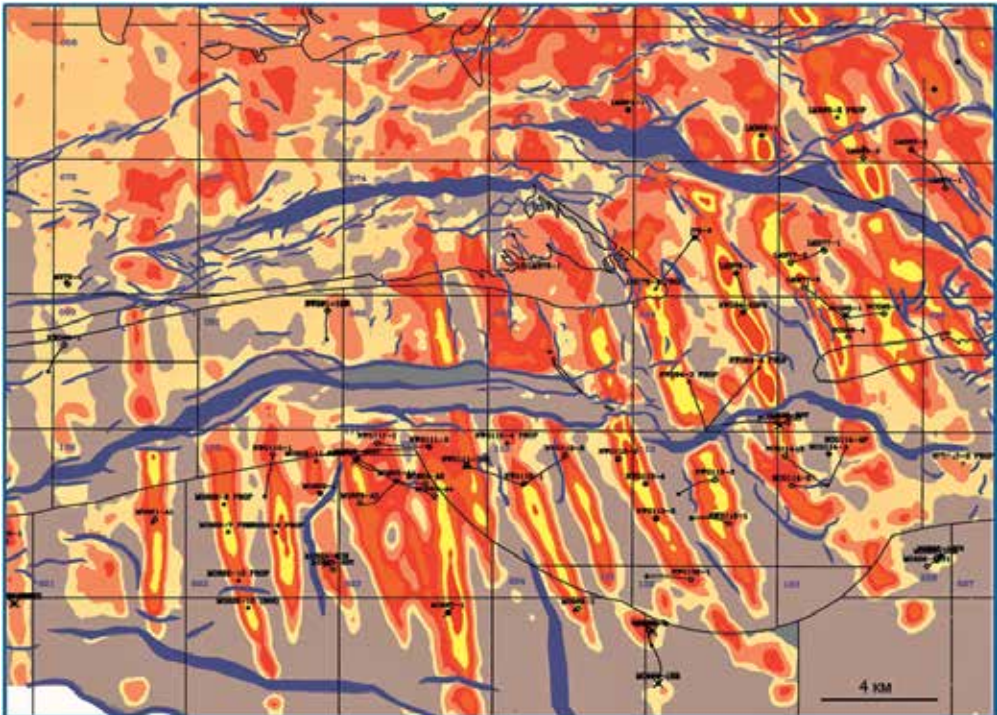
**Рисунок 8. Пустыня побережья Намибии с небольшими останцами (изолированными горными массивами инсельбергами); фотография сделана с Landsat 8, NASA, 2018**

Прибрежная зона шириной в 5–15 км (показана стрелкой) представляет собой современный аналог прибрежному золотому комплексу с формированием пляжей (обозначены белыми стрелками), дюн, барханов и вади.

Обломочный материал был перенесен на тысячи километров, в основном вдольбереговыми течениями и рекой Оранжевая, затем были подняты ветрами и переотложены на побережье. Этот пустынный комплекс считается самым древним (из современных): он состоит из двух перекрывающихся «песчаных морей» – эргов, образованных 21 и 5 млн лет назад.

Обозначения:

- Н – Хаучаб;
- К – Коичаб;
- U – Ури-Хаучаб.



**Рисунок 9. Суммарная пористость свиты Норфлет в заливе Мобил (Ajdukiewicz, 2010 [20])**

Песчаные разности откладывались в вытянутых золотых комплексах, с преобладанием дюн (ориентация – северо-запад на юго-восток), залегающих на эвапоритах Луанн. Отдельные тела мощностью до 245 м и шириной до 2500 м.

Глубокие и сверхглубокие коллекторы Норфлет сохраняют свои свойства благодаря хлоритовому покрытию, которое препятствует образованию вторичного кварцевого цемента. В уплотненных осадках образование глинистых минералов часто связано с условиями осадконакопления и, в частности, положением поверхностных вод. Это подтверждается петрографическими анализами современных разрезов песчаных дюн равнины Мескит (Калифорния) и Дюн Розовых Кораллов (Юта) (Busch, 2020 [21]). Существует большая вероятность, что из-за крутого падения слоев некоторые скважинные разрезы свиты Норфлет были неадекватно охарактеризованы испытаниями или данными каротажа. Ряд скважин в заливе Мобил вскрывал бортовую часть золотого комплекса, где встречал преимущественно плотные, непроницаемые разности; сопоставление результатов бурения с современными разрезами Намибии позволили пересмотреть перспективность таких участков (Fryberger, 2017 [22]).

#### **Диagenез песчаников Норфлет**

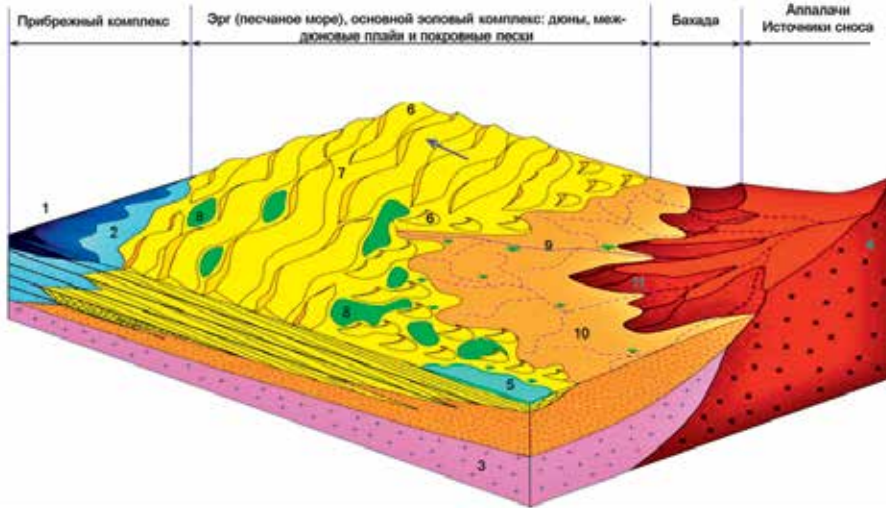
Одним из наиболее часто используемых приемов прогноза ФЕС песчано-глинистых разрезов является построение зависимости их свойств от глубины залегания. Золотые комплексы свиты Норфлет являются уникальным явлением, поскольку сохраняют аномально высокие значения пористости (более 20%) в глубоких и сверхглубоких (до 7500 м) разрезах (Godo, 2019 [13]).

Коллекторы характеризуются преимущественно первичной пористостью межгранулярного типа, сохранение которой связано с замедлением процессов цементации. Для офшорных и особенно глубоководных разрезов также отмечаются снижение давления вышележащих пород и одновременно относительное понижение градиентов пластовых температур.

Стратиграфически пласты Норфлет расположены между солями Луанн и мощными карбонатами Шмаковер, с незначительным содержанием глинистой компоненты. Благодаря этому пласты были изолированы от активной миграции пластовых вод, которые могли бы вызвать вторичную цементацию: на это также указывает присутствие галита в цементе и повышенная (по сравнению с остальными коллекторами залива) соленость пластовых вод. Так, например, при испытании подошвенной части разреза м. Геттисбург содержание солей составило более 240000 ppm, а в разрезе Титан – 350000 ppm (Godo, 2019 [13]).

Соленость оказывается особенно высокой в случае отсутствия в основании песчаных пород ангидритового слоя Сосновый Холл, относящегося к кровельной части свиты Луанн, или более распространенных подошвенных флювиальных аргиллитов.

Пористость и проницаемость песчаников Норфлет, в первую очередь, определяются условиями отложения. Сухие части дюн, связанные с переносом и переотложением ветром, содержат лучшие коллекторы, из которых могут формироваться мощные комплексы, названные «осыпями» (рис. 10). Эти участки связаны с процессами гравитационного переноса, перемещающими зерна на большие расстояния, и образуют породы с исключительными ФЕС (Douglas, 2010 [23]). Вторыми по качеству являются отложения внешней части активных дюн, связанные с ветровой рябью, где появляется возможность многократного перемещения зерен по склону, приводящего к повышению их сортировки и окатанности. Песчаные покровы в основании дюн и себкхи сложены породами худшего качества.



**Рисунок 10.** Палеогеографическая модель комплексов свиты Норфлет для глубоководной части Мексиканского залива, (по материалам Douglas, 2010 [20] и Mancini, 1986 [21])

Дополнительные обозначения:

1. Морское мелководье.
2. Солончаковый пляж – себкха (переработка в прибрежной зоне – RW).
3. Соли Луанн.
4. Магматические комплексы – источники сноса (Аппалачи).
5. Озера плайи (WI).
6. Дюны, барханы (дюновые комплексы:  $G_A-G_W-WR$ ).
7. Междюновые понижения (WR-DI).
8. Понижения с поверхностными водами (WI).
9. Руслу временных потоков (Вади).
10. Аллювиально флювиальная равнина ( $G_A-G_W$ ).
11. Аллювиальные конуса выноса склона (Бахада,  $G_A$ ).

**Таблица 2.** Основные литофации песчаников Норфлет и их комплексы, по данным керна (материалы Douglas, 2010 [23], и Mancini, 1986 [24])

Код	Литофации	Условия формирования. Текстуры	Фациальные комплексы
$G_A$	Песчаники мелко- и среднезернистые, с плоскопараллельной косою слоистостью, мощность слоев см, углы наклона 20–35°	Зерновые потоки и оползни крутых участков дюн	Зерновые потоки
$G_W$	Песчаники мелко- и среднезернистые, с косою слоистостью, мощность слоев от мм до см, углы наклона 10–25°	Зерновые потоки, чередующиеся с ветровым переносом (рябью); пологие участки дюн	
$W_{Rc}$	Песчаники мелко- и среднезернистые, с косою слоистостью, инверсионная градиционная сортировка, мощность слоев мм, полосчатость, углы 5–10°	Основания дюн, ветровая рябь с косою слоистостью,	Ветровой перенос
$W_{Rp}$	Песчаники мелко- и среднезернистые, с плоскопараллельной слоистостью, инверсионная градиционная сортировка, мощность слоев мм, полосчатость, углы 0–4°	Участки между дюнами, ветровая рябь с плоско-параллельной слоистостью,	
DI	Глинистые песчаники от мелко- до грубозернистых, плохо отсортированные, слоистость смятия от мм до см	Влажные участки между дюнами, под влиянием грунтовых вод, текстуры волнистые и смятия	Влажные участки (между дюнами), вади
WI	Песчаники от мелко- до грубозернистых, мм слойки, косая и волнистая слоистость в форме ряби	Влажные участки между дюнами, флювиальные отложения, следы течений коротких подтоплений	
RW	Песчаники от мелко- до грубозернистых, мм-см слойки, косая слоистость смятия и деформации	Переработка золотых комплексов мелководно-морскими течениями	Переотложения (переработки)
$T_R$	Карбонаты, эвапориты и красноцветные аргиллиты	Трансгрессия	Трансгрессивные комплексы

Примечание: кодировка показана на рис. 11.

Хлоритовые покрытия зерен присутствуют практически во всех песчаниках дюнового комплекса и, несмотря на значительные температуры – в заливе Мобил 160–220°C, – обеспечивают сохранение первичного пустотного пространства, в первую очередь, блокируя вторичную кварцевую цементацию. Эти выводы оказались справедливы не только для свиты Норфлет, но и для разрезов тренда Тускалуса и свиты Дьюпуи (Хяо, 2020 [25]). Есть все основания полагать, что при обнаружении золотых комплексов в разрезах Прикаспийского бассейна они также будут сохранять хорошие коллекторские свойства при погружении на большие глубины.

Песчаники, связанные с временными флювиальными потоками смыва, обладают наиболее низкими значениями пористости и проницаемости. В ряде продуктивных разрезов свиты их проницаемость оказалась настолько низкой, что капиллярного давления сгенерированных УВ оказалось недостаточно для миграции. При разбуривании таких интервалов на шламмометрии отсутствуют нефте- и газопроявления, несмотря на близкое соседство со зрелыми нефтематеринскими комплексами, находящимися к тому же в зоне аномально высокого пластового давления. На ранних этапах разведки в этом комплексе основное внимание уделялось исключительно общей и эффективной пористости – понимание критичной роли проницаемости для нисходящей миграции нефти пришло значительно позднее, после бурения объекта Петербург (Godó, 2019 [13]).

Основываясь на серии разрезов<sup>2</sup> мелководья Алабамы (залив Мобил) с глубинами 6126–6645 м и температурами до 215°C, была предложена модель формирования хлоритовых каемок для прогноза ФЕС Норфлет (Ajdukiewicz, 2010 [20]). Эти результаты были успешно использованы при оценке рисков и перспектив сверхглубоких объектов каньона ДеСото.

Для разрезов этой территории было характерно присутствие в кровле участка обильной кварцевой цементации мощностью от 3 до 58 м, где пористость падала ниже 8%, а проницаемость, соответственно, составила менее 1,0 мД. Состав обломочной части указывал, что песчаники были сформированы из расположенных на севере, разрушенных участков Аппа-

лачского горного массива. Их отложение происходило в условиях расширяющегося в широтном направлении (запад – восток) грабена. На континентальных участках этим отложениям соответствуют плохо отсортированные песчаники и конгломераты аллювиальных конусов выноса и временных русел – вади, которые поставляли этот материал на засоленную равнину побережья. В дальнейшем они перерабатывались ветром и в меньшей степени вдольбереговыми течениями и отлагались в виде комплексов дюн, проградационно выдвигающихся в юго-западном направлении, перекрывая соль.

По результатам скважин и объемной сейсморазведки выявилось, что продуктивные песчаники формируют узкие, вытянутые с севера на юг, субпараллельные полосы мощностью до 250 м и длиной до 1520 м, разделенные участками менее 90 м. (рис. 9). По данным керна и микросканнеров, золотые комплексы были интерпретированы как дюны звездчатого строения и барханы-сеифы<sup>3</sup>. Эта морфология юрских дюн оказалась исключительно близкой к современным отложениям побережья Намибии (рис. 8). В современных пустынях интервалы в понижениях между барханами стабилизированы близко расположенными поверхностными водами. Аналогично этому междюновые участки свиты Норфлет были «привязаны» к зеркалу прибрежных вод, которое двигалось в зависимости от трансгрессий и регрессий.

Геолокация отложений современных пустынь показала, что поверхность вод под активными дюнами в засушливых условиях расположена практически горизонтально. Однако в более влажные периоды она выгибается вниз, располагаясь параллельно топографической поверхности песчаного комплекса (Busch, 2020 [21]). Такие же эффекты могут наблюдаться в случае покрытия песчаных зерен глинистыми минералами, повышающими площадь удельной поверхности и, соответственно, капиллярное давление

Одной из характерных особенностей глинистых покрытий песчаников Норфлет, являются хорошо оформленные, вытянутые кристаллы диагенетического хлорита. Ориентировка кристаллов перпендикулярно поверхности зерна указывает на их образование из поровых флюидов.

<sup>2</sup> Использовались данные керна, испытаний и каротажа из 60 скв.

<sup>3</sup> Крупные вытянутые песчаные гряды.



В разрезах Мобил Бей коллекторы характеризуются необычными, обогащенными магнием, разностями. В то время как для морских осадков более типичным является хлорит, обогащенный железом (Xia, 2020 [25]). Это, вероятно, связано с замещением первичного покрытия, представленного сапонитом<sup>4</sup> (обогащенной магнием разности смектита), который выпадает в условиях сухого климата из солончаковых рассолов. По мере погружения и повышения пластовых температур этот минерал мог переходить в обогащенный магнием хлорит (Ryan, 2002 [26]). В современных эоловых условиях такие «предшественники» хлорита начинают формироваться на поверхности или чуть ниже поверхности

грунтовых вод, при погружении на глубину около 1 м.

Коллекторские свойства сверхглубоких разрезов свиты Норфлет определяют типом глинистого покрытия поверхности зерен, происходящего на ранней стадии преобразования осадка в породу. Активные участки дюнового комплекса оказываются не лучшими разностями, если перед погружением они не проходили этап стабилизации и промывки поверхностными водами. В песчаниках выделяются 3 типа хлоритовых покрытий, соответствующих различным участкам пустынного палеокомплекса и определяющих возможность сохранения ФЕС на больших глубинах (табл. 3).

**Таблица 3. Модели диагенетических изменений песчаников свиты Норфлет в СГ-разрезах севера Мексиканского залива (по материалам Ajdukiewicz, 2010 [20], и Douglas, 2010 [23])**

Лито-фации	Условия отложения	Изменения		ФЕС
		Начальной фазы, при низких Т	Последующие, при высоких Т	
W <sub>RC</sub> W <sub>RP</sub>	Сухая, вадозная часть в кровле дюны	Переотложение исходных покрытий, перекристаллизация высоко-Т глин	Абразия, кварцевая цементация	Низкие К, Ф
			Вытянутый иллит, усиление растворения давлением	Низкие К, Ф
G <sub>A</sub> , G <sub>W</sub> R <sub>W</sub> ?	Средняя часть дюны, разбавленные метеорные воды	Исходные покрытия, КПШ – переходят в каолинит; угловатый хлорит → углистый иллит; каолинит + КПШ → диагенетический иллит	Пленочное выполнение пор, кварц цементация остановлена	<b>Высокие К, Ф</b>
			Волокнистый иллит, кварц цементация остановлена	<b>Высокие Ф</b> Низкие К
DI ? WI	Нижняя часть дюны, грунтовые солоноватые воды (Фр)	Протяженные хлоритовые покрытия; диагенетические покрытия	Хлоритовое покрытие, кварц цементация остановлена	<b>Высокие К, Ф</b>
Т = температура; К – проницаемость, Ф – пористость КПШ = калиевые полевые шпаты; Фр = фреатические воды				

К первому типу относится раннедиагенетический хлорит, вероятнее всего, образовавшийся из сапонита в нижней части дюны, которая находилась под или очень близко к уровню пересоленных грунтовых вод. Во время дальнейшего захоронения полностью покрывающая обломочные зерна, хлоритовая каемка препятствует образованию вторичного кварца, сохраняя первичную межгранулярную пористость (до 22%) и проницаемость (сотни мД).

Второй тип представлен наклонными почвенными натекками и пленками, полностью покрывающими песчаные зерна. Он сформировался на приподнятых участках,

которые периодически подвергались воздействию пресных вод – временных потоков или дождей. Образовавшиеся при этом кристаллы хлорита при высыхании налипали на поверхности; такой процесс повторялся многократно, что приводило к нескольким слоям или натеккам. В стабилизированных дюнах этот хлорит полностью покрывал внутреннюю поверхности и предотвращал последующее новообразование кварца, сохраняя большую часть первичной пористости. Однако пресные воды также растворяли зерна полевых шпатов, образуя каолинит, который на более поздних стадиях диагенеза вступал во взаимо-

<sup>4</sup> Ca<sub>0,25</sub>(Mg, Fe)<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>·n

действие с остатками калиевых полевых шпатов и образовывал нитевидный иллит. В результате пористые песчаники оказывались низкопроницаемыми.

Третий тип покрытия – это нарушенные абразией, прерывистые корки, сложенные смесью диагенетического хлорита и наклоненного под углом иллита. Такие покрытия образовывались при ремобилизации, переносе и многократном переотложении изначально покрытых глинистой коркой зерен. Эти условия соответствуют наиболее активным участкам золотого комплекса, когда последующая кварцевая цементация практически полностью заполняла межгранулярное поровое пространство.

### Характеристика коллекторов песчаников Норфлет

Хлоритовые покрытия позволяют сохранять пористость при погружении и повышении температур в различных разрезах Тускалуса, Дьюпуи и многих других

(Хя, 2020 [25]). Однако их влияние на ФЕС глубоких и сверхглубоких разрезов Норфлет оказалось в достаточной мере уникальным явлением.

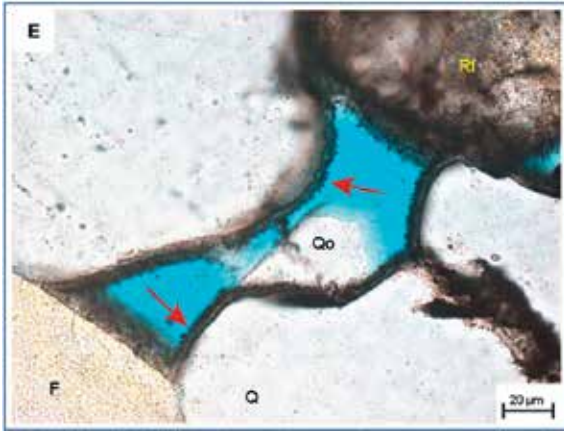
В ряде месторождений, расположенных на континентальной части штата Алабама, были вскрыты мощные песчаные интервалы свиты, в которых, несмотря на хорошие значения общей пористости, абсолютная проницаемость, по сравнению с оффшорными и прибрежными разрезами, снижалась в разы (табл. 4; значения показаны в соответствии с плотностью вероятности 90, 50 и 10%). Эта разница связана с развитием тонкого нитевидного иллита, блокирующего поровое пространство и перекрывающего каналы. Современные залежи в заливе Мобил содержат сухой газ, однако в кровле продуктивной толщи отмечаются следы палео-водонефтяного контакта (далее – ВНК), представленные пиробитумами на поверхности некоторых зерен и пузырькообразными включениями в кварцевом цементе.

**Таблица 4. Распределение абсолютных проницаемостей свиты Норфлет в пластовых условиях (рассчитанных из мобильности с учетом вязкости), по результатам испытаний и отбора проб некоторых месторождений**

Площадь	Количество образцов	Интервал, м		Проницаемость, мД		
				P90	P10	P50
Аппоматокс	19	7872,27	7886,87	0,26	27,83	1,88
Баллимор	36	8656,02	8862,49	37,90	314,77	97,87
Коринф	33	7438,68	7839,71	4,60	215,56	61,16
Форт Самтер	105	8598,42	9024,17	1,80	142,83	10,12
Предатор	26	6023,57	6247,21	0,10	90,67	24,82
Рутберг	44	7656,00	7953,52	0,43	139,12	2,07
Виксбург «В»	58	7456,91	7538,80	0,04	7,95	0,25
<b>ВСЕГО</b>	<b>321</b>	<b>6023,57</b>	<b>9024,17</b>	<b>0,21</b>	<b>162,73</b>	<b>8,75</b>

Практически во всех низкопористых участках кровельной части Норфлет отмечалось присутствие хорошо раскристаллизованного хлорита. Детальный анализ результатов электронной микроскопии показал, что для них характерны нарушения

сплошности покрытия, и при достижении породами экстремальных значений (давление – температура), при погружении на глубины более 5500 м этого оказывается достаточно для формирования вторичного кварца (рис. 11).



**Рисунок 11. Анализ структуры порового пространства кровельной части свиты Норфлет в проходящем свете**

Красными стрелками указаны корочки хлоритового состава, покрывающие большую часть кварцевых (Q) и полевошпатовых (F) зерен, и окатанного метаморфизованного обломка (Rf). В центральной части открытой поры (голубое), где отсутствовал хлорит – появляется вторичный кварц (Qo).

Наиболее типичными литофациями глубоких оффшорных коллекторов являются зерновые потоки (оползни) и интервалы ветровой ряби (переноса). Текстура песчаных разностей, в первую очередь, а также сортировка и окатанность на начальном этапе контролируют структуру межгранулярного пространства, его пористость и проницаемость. Через энергию процессов осадконакопления эти текстуры связаны с фаціальными обстановками. В продуктивных разрезах Норфлет верхние и нижние зоны сложены различными литофациями, связанными с ветровым переносом и зерновыми потоками соответственно. При повышении содержания диагенетического цемента кварцевого состава ФЕС становятся исключительно низкими, что характерно для плотных зон верхней части разреза, связанных с себкхами и междюновыми покровами.

#### Генерация и насыщение УВ

Моделирование УВ-системы верхнеюрского интервала указывает, по крайней мере, на 2 фазы образования нефти: в верхнемеловое время (~65 млн лет) и в среднем миоцене (15 млн лет). Оба пика связаны с быстрым и существенным увеличением мощности вышележащих отложений (Godó, 2019 [13]). На весьма сходные условия указывали и работы, выполненные для южной части залива – складчатого пояса Пердидо (Davison, 2017 [27]). Анализ изменений пластового давления и температур для теоретической сверхглубокой

На основании выборки из 16 образцов песчаников (три свиты – Тускалуса, Норфлет и Дююпи), были предложены зависимости микропористости хлорита (%) от его объема (%).

для обогащенных железом разностей:

$$\Phi_{\text{micro}} = \frac{7.08 \times V_{\text{clay}}}{0.39 \times V_{\text{clay}} + 2.26} + 0.927$$

для обогащенных магнием:

$$\Phi_{\text{micro}} = \frac{7.08 \times V_{\text{clay}}}{1.88 \times V_{\text{clay}} + 7.83} + 0.927$$

скважины указывает на начало генерации нефти при опускании на глубину от 4800 м до, по крайней мере, 7600 м, жидкого газа и конденсатов – до 9300–9800 м (Wang, 2020 [28]).

В каньоне ДеСото 4 вскрытых объекта Норфлет получили нефть в меловое время: Антиетам, Шилох, Титан и Лизбург. В первых трех подвижные УВ присутствуют и сегодня, а в Лизбурге отмечена только остаточная нефть. Во всех четырех объектах предполагалось присутствие значительно большей колонны УВ, которая в дальнейшем из-за нарушения покрышки была расформирована. Во всех случаях наиболее вероятной причиной стало медленное капиллярное просачивание.

Остальные ловушки с нефтями более поздней (миоценовой) генерации оказались заполнены полностью и без следов остаточной нефти или расформирования залежи (Godó, 2019 [13]). Об этом свидетельствует отсутствие изменения окраски песчаных пород и нефте- и газопроявлений ниже установленного ВНК. Более современные структурные нарушения, вероятно, позволяют некоторую утечку УВ из ловушек, однако со скоростями, позволяющими сохранить коммерческие залежи. Проанализировав выборку из 350 крупнейших месторождений, Д. МакГрегор предположил, что все эти залежи являются «динамичными и коротко живущими» явлениями со средней (медианной) протяженностью существования в 35 млн лет (Macgregor, 1996 [29]). В случае со сверхглубокими за-

лежами свиты Норфлет это время составляет, по крайней мере, 15 млн лет.

Ряд открытий в песчаниках верхней юры оказались не полностью заполнены

по отношению к последней замкнутой отметке антиклинальной ловушки. К таким относятся залежи Геттисбург, Рудберг, и вероятно, Висксбург «А» и «В».

### Список использованной литературы

1. Blakey R.C. Using Paleogeographic Maps to Portray Phanerozoic Geologic and Paleotectonic History of Western North America. – Search and Discovery, 2013, Article #30267.
2. Hudec M.R., Norton I.O., Jackson M.P.A., and Peel F.J. Jurassic evolution of the Gulf of Mexico salt basin. – American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2013, v. 97, No. 10, p. 1683–1710.
3. Hudec M.R., Jackson M.P.A., and Peel F.J. Influence of deep Louann structure on the evolution of the northern Gulf of Mexico. – American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2013, v. 97, No. 10, p. 1711–1735, doi:10.1306/04011312074.
4. Jackson M.P.A., Hudec M.R., Salt Tectonics: Principles and Practice. – Cambridge, Cambridge University Press, 2017.
5. Comisión Nacional de Hidrocarburos, [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/65927/003\\_ABR-JUN\\_2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/65927/003_ABR-JUN_2015.pdf), 2015.
6. Blakey R.C. and Ranney W. Ancient Landscapes of Western North America: A Geologic History with Paleogeographic Maps. – Project: Ancient Landscapes of Western North America. DOI: 10.1007/978-3-319-59636-5, 2017.
7. Scotese C.R., Atlas of Earth History. – PALEOMAP Project, Arlington, Texas, 2001, p. 52. (<http://www.scotese.com/>).
8. Galloway W.E. Depositional Evolution of the Gulf of Mexico Sedimentary Basin. – In: Sedimentary Basins of the World, Vol 5, The Sedimentary Basins of the United States and Canada, ed. Miall A.D., Elsevier, 2008, pp. 505 – 549.
9. Galloway W.E., Ganey-Curry P.E., Li X., Buffler R.T. Cenozoic depositional history of the Gulf of Mexico basin. – American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2000, v. 84, No 11, pp. 1743–1774.
10. Weimer P., Bouroullec R., Adson J., Cossey S.P. An overview of the petroleum systems of the northern deep-water Gulf of Mexico. – American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2017, v. 101, No 7, pp. 941–993.
11. Godo T. The Appomattox field: Norphlet Aeolian sand dune reservoirs in the deep-water Gulf of Mexico. – In the book «Giant fields of the decade 2000–2010» (Eds Merrill R.K. and Sternbach C.A.), AAPG Memoir, Sept. 2017, p. 29–54.
12. Snedden J.W. Stockli D.F. and Norton I.O. Paleogeographic Reconstruction and Provenance of Oxfordian Aeolian Sandstone Reservoirs in Mexico offshore areas; comparison to the Norphlet Aeolian System of the Northern Gulf of Mexico. – Geological Society, London, Special Publications. University of Glasgow, 2020.
13. Godo T. The Smackover-Norphlet Petroleum System, Deepwater Gulf of Mexico: Oil Fields, Oil shows, and Dry Holes. – Gulf Coast Association of Geological Societies, 2019, v. 8, p. 104–152.
14. Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) – [www.boem.gov/oil-gas-energy/leasing/eastern-gulf-mexico-sale-181-information](http://www.boem.gov/oil-gas-energy/leasing/eastern-gulf-mexico-sale-181-information), 2020.
15. Ings S.J. and Beaumont C. Shortening viscous pressure ridges, a solution to the enigma of initiating salt “withdrawal” minibasins. – Geology, 2010, v. 38, p. 339–342.
16. Nagihara S. and Smith M.A. Geothermal gradient and temperature of hydrogen sulfide-bearing reservoirs, Alabama continental shelf. – American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2015, v. 89, No. 11, pp. 1451–1458.
17. Kocurek G., and Havholm K. Eolian sequence stratigraphy – A conceptual framework. – In the book “Recent advances in and applications of siliciclastic sequence stratigraphy” (Eds Weimer P. and Posamentier H.), American Association of Petroleum Geologists Memoir 58, Tulsa, Oklahoma, 1993, p. 393–409.
18. NASA. [Earthobservatory.nasa.gov/images/87798](http://earthobservatory.nasa.gov/images/87798), 2018.
19. NASA. [Earthobservatory.nasa.gov/images/92695](http://earthobservatory.nasa.gov/images/92695), 2018.



20. Ajdukiewicz J.M., Nicholson P.H., and Esch W.L. Prediction of deep reservoir quality using early diagenetic process models in the Jurassic Norphlet Formation, Gulf of Mexico. – American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2010, v. 94, No. 8, pp. 1189–1227.
21. Busch B. Pilot study on provenance and depositional controls on clay mineral coatings in active fluvio-eolian systems, western USA. – Sedimentary Geology, June, 2020.
22. Fryberger S.G, Hern C.Y. and Jones N. Modern and Ancient Analogues for Complex Eolian Reservoirs. – Search and discovery, Article #51401, AAPG Rocky Mountain Section Annual Meeting, 2017.
23. Douglas S.W. The Jurassic Norphlet Formation of the Deep-Water Eastern Gulf of Mexico: A Sedimentologic Investigation of Aeolian Facies, their Reservoir Characteristics, and their Depositional History. – M.S. Thesis, Baylor University, 2010.
24. Mancini E.A., Mink R.M., and Bearden B.L. Integrated geological, geophysical, and geochemical interpretation of Upper Jurassic petroleum trends in eastern Gulf of Mexico: Transactions. – Gulf Coast Association of Geological Societies, United States, 1986, v. 36, p. 219–226.
25. Xia H., Perez E.H., Dunn T.L. The impact of grain-coating chlorite on the effective porosity of sandstones. – Marine and Petroleum Geology, 2020, v. 115, 104237.
26. Ryan P.C. and Hillier S. Berthierine/chamosite, corrensite, and discrete chlorite from evolved verdine and evaporite-associated facies in the Jurassic Sundance Formation, Wyoming. – American Mineralogist, 2002, v. 87, p. 1607–1615.
27. Davison I. and Cunha T.A. Allochthonous salt sheet growth: Thermal implications for source rock maturation in the deepwater Burgos Basin and Perdido Fold Belt, Mexico. – Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists, Interpretation, 2017, v. 5, No. 1, p. T11–T21.
28. Wang C., Zeng J., Yu Y., Cai W., Li D., Yang G., Liu Y., Wang Z. Origin, migration, and characterization of petroleum in the Perdido Fold Belt, Gulf of Mexico basin. – Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 107843.
29. Macgregor D.S. Factors controlling the destruction or preservation of giant light oilfields. – Petroleum Geoscience, 1996, v. 2, p. 197–217.

## ҮЛКЕН ТЕРЕҢДІКТЕГІ МҰНАЙ. МЕКСИКА ШЫҒАНАҒЫНЫҢ ОФФШОРЛЫҚ КЕН ОРЫНДАРЫ

Қ.О. Исқазиев, П.Е. Сынгаевский, С.Ф. Хафизов

*Бұл мақала әлемдік мұнай-газ алаптарының жоғары тереңдікте қалыптасқан (6 км+) көмірсутегі беткейлерінде белсенді түрде жүргізіліп жатқан барлау және игеру жұмыстары туралы топтамалардың жалғасы болып табылады және, соның ішінде, Каспий маңы мегабассейндері жобаларының баламасы ретінде Еуразия Жобасы қарастырылған.*

*Мексика шығанағы өзінің игеру тарихының ұзақтығы себебінен үлкен қызығушылық тудырып отыр. Әйткені бұл аймақ ауқымды игерілген себептерден, осы уақыт ішінде жиналған мәліметтердің ауқымды көлемін талдауға мүмкіндік береді.*

*Мексика шығанағы үш елдің – АҚШ, Мексика және Кубаның терең теңіз, қайраң және жағалау бөліктерін қамтиды және әлемдегі ең маңызды мұнай-газ провинцияларының бірі болып табылады. Оның түзілімдерінің жалпылама қалыңдығы 14000 м (одан да жоғары) әр-түрлі тау-жыныстық кешендерімен қалыптасқан – орта юрадан бастап осы заманғы түзілімдерге дейін. Бұл аймақта көмірсутектерді барлау 100 жылдан шамасындай уақытқа жалғасып келеді. Осы уақыт ішінде өнімді коллекторларды сипаттау мен көмірсутектерді іздестіру мақсатында түрлі жаңа технологиялар жасақталып, сәтті қолданылды, мысалы, қысымы өте жоғары қойнауқаттарды болжау, циклостратиграфия және сейсмофациалық талдау, төменгі-омды өткізгіш қойнауқаттарды сипаттау және де жоғарғы тереңдіктегі кен-орындарын іздестіру әдістері пайдаланылған.*

*Шығанақта игерудегі барлық нысандар түрлерінің ішіндегі негізгі қызығушылық жоғары тереңдікте қалыптасқан қойнауқаттардың Каспий маңы мегаалқабының Юра дәуірі Норфлет тастопшасына (свита) байланысты болып табылады, және де,*

осыған байланысты зерттеулер мәтіні осы мақаланың негізгі бөлігінде баяндалған. Әрине, тікелей салыстыру туралы айтуға болмайды, дегенмен, атап айтқанда, кескін бөлігінің золалық шығу тегі бұл нысанды айтарлықтай ерекшелендіреді. Дегенмен, авторлардың пікірінше, оны зерттеу, сондай-ақ оны игеру бойынша сәтті жобаның өз көз-алдымызда жүзеге асырылуын айқындау, Каспий теңізінің терең беткейлерінде болашақта жүргізілетін жұмыстарға арналған көптеген маңызды ақпарат бере алады.

Мақала екі бөлімнен тұрады. Біріншісі – Мексика шығанағы бассейнінің қалыптасуының геологиялық тарихы, терең жатқан Норфлет свитасының өнімді кешенінің ерекшеліктері. Екінші бөлімде, Норфлет өнімді кешенінің барлау тарихы, негізгі ашу жаңалықтарының сипаттамасы, сондай-ақ Мексика шығанағындағы (АҚШ және Мексика секторлары) Норфлет тастопшасындағы жаңа терең кен-орындарының ашылу болашағы туралы мәліметтер келтірілген. Ғаламдық «ойыншы» ретінде Шелл компаниясының күшімен, осы кешенді игеру тарихын талдау, басқа мұнай-газ алқаптарында, соның ішінде Каспий маңы бассейндерінде терең жатқан беткейлерді игеру сценарийлерінің негізгісі болмаса да, олардың бірі болып табылатыны анық. Қазіргі таңда, жаһандық алпауыт компаниялар (International Oil Companies) технологияларды пайдаланып, осы мәселені шешу үшін қажетті ресурстарын әбден жұмылдыра алады.

Түйін-сөздер: Мексика шығанағы, Каспий маңы мегаалабы, шөгінді жыныстар бассейні.

## DEEP OIL. OFFSHORE DEPOSITS OF THE GULF OF MEXICO

K.O. Iskaziev, P.E. Syngaevsky, S.F. Khafizov

*This article continues a series of reviews of the world's oil and gas basins, where active exploration and development of hydrocarbon deposits in superdeep (6 km +) horizons are taking place, as probable analogues of projects in the Caspian megabasin, primarily the Eurasia project. In this regard the Gulf of Mexico is of great interest, since this region is very well studied over such a long history of its development and thus makes it possible to analyze a huge amount of data collected during this time.*

*The Gulf of Mexico includes the deep-water, offshore and coastal parts of three countries – the United States, Mexico and Cuba, and is one of the most important oil and gas provinces in the world. Its deposits are represented by various complexes – from the Middle Jurassic to modern sediments, with a total thickness of 14,000 m and more. Exploration for hydrocarbons has been going on here for almost 100 years. During this time, various new technologies have been developed and successfully applied, such as forecasting abnormally high reservoir pressure, cyclostratigraphy and seismic facies analysis, characterization of low-resistivity productive reservoirs and the search for ultra-deep hydrocarbon deposits.*

*Of all the variety of objects developed in the Gulf, in the context of the study of deep deposits, the main interest and possible associations with the Caspian megabasin are the deposits of the Norflet Formation of the Upper Jurassic, which are discussed in the main part of this article. Of course, we are not talking about a direct comparison; in particular, the aeolian origin of part of the section makes this object significantly different. Nevertheless, according to the authors, studying it, as well as understanding how a successful project for its development is being implemented right before our eyes, can provide a lot of important information for working in the deep horizons of the Caspian region.*

*The article is divided into two parts. The first examines the geological history of the formation of the Gulf of Mexico Basin, the features of the deep-lying productive complex of the Norflet Formation. The second part provides information about the history of exploration of the Norflet productive complex, characteristics of the main discoveries, as well as the prospects for discoveries of new superdeep deposits in the Norflet Formation within the Gulf of Mexico (sectors of the United States and Mexico). Analysis of the history of the development of this complex by the global «player» – Shell, is very important, as one of the scenarios for the development of deep horizons in other oil and gas basins, incl. Caspian. International*

*Oil Companies are able to mobilize the necessary resources and technology to effectively address this challenge.*

*Key words: Gulf of Mexico, Caspian megabasin, sedimentary basin.*

### **Информация об авторах**

**Исказиев Курмангазы Орынгазиевич** – канд. геол.-мин. наук, профессор, Генеральный директор, Председатель Правления АО «Разведка и Добыча «КазМунайГаз», *k.iskaziyev@kmgep.kz*.

АО «Разведка и Добыча «КазМунайГаз», г. Нур-Султан, Казахстан

**Сынгаевский Павел Евгеньевич** – канд. геол.-мин. наук, старший советник, петрофизик, *shadow63raven@yandex.ru*.

Noble Energy, США

**Хафизов Сергей Фаизович** – докт. геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой поисков и разведки нефти и газа РГУ нефти и газа им. Губкина, *khaifizov@gubkin.ru*.

РГУ нефти и газа им. Губкина, г. Москва, Российская Федерация