

Корреляция триасовых горизонтов Центрального Грабена на юге Великобритании: новый взгляд на решение старой задачи

Subsurface correlation of the Triassic of the UK southern Central Graben: new look at an old problem

Mat De Jong¹, David Smith², S. Djin Nio¹ и Nick Hardy³ обсуждают изменение климата как основной фактор вертикального изменения литофаций, позволяющего проводить времяемкую стратиграфическую классификацию, используя стандартный скважинный каротаж, чувствительной к смене фаций, например, гамма-каротаж.

Знанию триасовой стратиграфии в Центральном Грабене препятствует отсутствие региональных сейсмических маркирующих горизонтов, неполный отбор микроскопических органических остатков и сложность региональных структур. Из всех имеющихся источников данных (сейсморазведка, каротаж, выбуренная порода, керн/боковой керн), самой достоверной и непрерывной, конечно, должна быть диаграмма каротажа на кабеле. За исключением небольших случайных интервалов плохих данных, каротажные диаграммы доступны почти для всех скважин Северного моря, что является беспрецедентным источником объективных и близко расположенных измерений различных физических величин. Идеальный стратиграфический метод извлек бы времяемкую информацию из каротажных диаграмм, обеспечивая корреляцию почти с таким же разрешением, как у самих каротажных диаграмм.

Мы здесь описываем экспериментальное приложение как раз такого подхода к 16 скважинам в южной части Центрального Грабена Великобритании, участки 22 и 30 (рис. 1). Наш метод основан на а) новом методе извлечения трендов спектральных (длина волны, частота и фаза) составляющих диаграммы каротажа на кабеле, и б) на интерпретации этой информации в терминах климатических изменений за счет орбитальных сдвигов в диапазоне волн с периодом $10^4 - 10^5$ лет.

Мы сначала выделяем региональный фон для унификации схемы триасовой корреляции, которая легко применима ко всем значимым триасовым пластам, вскрытым скважинами исследуемого района. Затем описываем основные правила, лежащие в основе метода. Наконец, мы описываем стратиграфическую схему, которая возникает из этого первичного исследования, и обсуждаем его значение.

Региональный фон

Триасовые отложения Центрального Грабена Великобритании являются частью регионального высокотемпературного/высоконапорного комплекса нефтегазоносных пород, и наша область исследования включает некоторые из месторождений, разработанных по

проекту Eastern Trough Area (ETAP - Pooler и Amory, 1999; McKie и Audretsch, 2005). В то время как большая часть разреза составлена тонкозернистыми отложениями, фации песка резервуара приурочены к середине позднего триаса, и вместе слагают формацию Skagerrak. Эти пески представляют собой экономические резервы нефти, газа и конденсата, и детальное знание их стратиграфии является очень важным для их разработки, так же как для дальнейшего исследования этого нефтегазоносного комплекса.

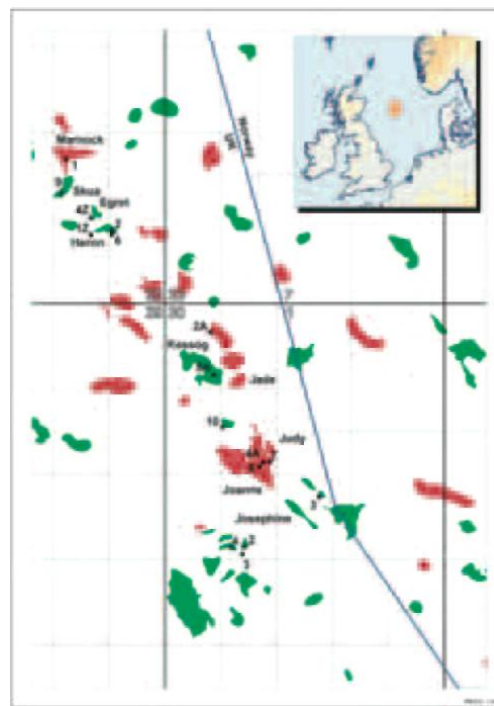


Рис. 1. Карта расположения 16 скважин, включенных в исследование. Месторождения нефти показаны зеленым, а месторождения газа — красным. Скважины пронумерованы своими номерами по порядку бурения в пределах каждого блока (например, скважина, показанная для месторождения Marnock, имеет номер 22/24a-1).

¹ ENRES International, Ruysdaellaan 3, 3712 AP Huis ter Heide, The Netherlands.

² ENRES UK, 15 Stratton Terrace, Truro, Cornwall, TR1 3EW, UK.

³ IHS Energy, Tetbury, Gloucestershire GL8 8RX, UK (Merlin Energy, Ledbury, Herefordshire, HR8 2EK, UK).

Междисциплинарная задача

Усложняющим фактором, характерным для данного района, является раздробленность триасовых слоев сетью разломов, для многих из которых ясно наблюдается движение соли. Механизм и длительность этих движений, как по-разному полагают, являются синлитологическими, либо постлитологическими относительно отложения триасовых пород. Stewart и Clark (1999), например, поддерживали синлитологическую модель и ее прямые следствия для литологической топографии в триасовом периоде. Penge и др. (1999) вместо этого предложили модель «плоскости разлома», которая включает постлитологическую деформацию и раздробление триасовых отложений. Хотя соляные штоки создают большие проблемы для корреляции, основанной на сейсмических данных, эти дебаты являются менее важными для наших результатов, поскольку мы отдаем роль основного фактора вертикальных вариаций литофаций внешней движущей силе.

Преыдушие стратиграфические схемы и методы

Литостратиграфически, триасовые отложения исследуемого района песчаные отложения формации Skagerrak и подстилающую формацию Smith Bank (главным образом мелкозернистые, биостратиграфически непродуктивные отложения). Эти две формации, вероятно, местами латерально эквивалентны, хотя общее отсутствие окаменелостей сделало очень трудным доказательство этого факта.

Достаточный отбор остатков полиноморфы в южной части Центрального Грабена (британские участки 29 и 30) позволил Goldsmith и др. (1995) выполнить отличную датировку части разреза. Отложения нижнего триаса остались недатированными, но хорошие скопления органики в среднем и частично позднем триасе были найдены в нескольких скважинах. Несмотря на этот надежный способ корреляции разреза между скважинами, Goldsmith и др. предложили новые литостратиграфические способы, зависящие прежде всего от корреляции каротажных диаграмм; биостратиграфические данные использовались для подтверждения каротажных пикировок.

Stage	Sequence	Lithostratigraphic Units
Rhaetian	Tr 50	Joshua Mudstone Member
Norian	Tr 40	Josephine Sandstone Member
		Jonathan Mudstone Member
Carnian	Tr 30	Joanne Sandstone Member
Ladinian	Tr 20	
Anisian	Tr 10	Julius Mudstone Member
		Judy Sandstone Member
Scythian	Tr 00	Smith Bank Formation

Табл. 2. Литостратиграфическая и сейсмостратиграфическая схемы Goldsmith и др. (1995 и 2002 гг.).

Они предложили разбиение формации Skagerrak на шесть пачек, с поочередным преобладанием песка и сланца. Важно, что это подразумевало латерально обширное осаднение сланцев на границе Anisian-Ladinian и в позднем Carnian: по результатам интерпретации эти отложения приурочены к эвстатическим колебаниям. Существенная проблема, связанная с этими пачками, заключается в трудности их прослеживания на север, в область Marnock и дальше: это частично связано с используемыми в данной статье методами.

Goldsmith и др. (2002) предложили предварительную схему сейсмостратиграфии триасовых отложений центральной части Северного моря, основанную на обычной интерпретации каротажных данных, с опорой на сильно ограниченные палинотратиграфические данные, доступные для некоторых участков. Корреляция на основе поведения диаграммы каротажа на кабеле и литостратиграфических методов была признана проблематичной. Была сделана попытка корреляции интерпретированных заводненных пластов с теми пластами, которые распознаны в более известном разрезе в направлении от берега средней Норвегии к Баренцевому морю, но подобные корреляции на большие дистанции, в значительной степени незакрепленные четкими данными о возрасте, должны расцениваться как очень спекулятивные. Мы не уверены, что возможна сейсмостратиграфическая классификация по характеру имеющейся информации, и сделанные Goldsmith и др. описания комплексов Tr00 к Tr50, вместе с их картами распространения фаций на основе этой классификации, должны использоваться с пониманием этих ограничений.

Принципы климатической стратиграфии

Наш подход к стратиграфической корреляции основан на значимости климатических изменений за счет сдвигов земной орбиты, как основного регулятора вертикальной последовательности литофаций. Климат оказывает огромное воздействие на каждой стадии цикла выветривание, эрозия, транспортировка и отложение осадков. Климатические изменения за счет орбитальных сдвигов (Milankovitch) характеризуются достаточно большими временными интервалами ($10^4 - 10^5$ лет), чтобы гарантировать, что последовательные климатические фазы, вероятно, будут представлены в длительной записи. Эта часть стратиграфического временного спектра достаточно длительна, чтобы иметь справедливый шанс на представление в «конечной» колонке, и является достаточно короткой, чтобы иметь прямую экономическую значимость в терминах стратиграфии резервуара, типично представляемой в вертикальной шкале от метров до десятков метров. Мы предусматриваем, что стратиграфическая колонка включает короткие интервалы чистого накопления осадка, «постоянно» прибавляющегося к колонке, отделенные паузами большой длительности. Каждый интервал чистого накопления осадка типичен для окружающих и, следовательно, климатических условий, преобладающих во время его осаднения. В дальнейшем он сохранит запись, хотя и искаженную, любого изменения климата, которое имело место в течение интервала времени, который он представляет.

Климатическое изменение за счет орбитального сдвига вызывается изменениями инсоляции, потока солнечной энергии, падающего на поверхность Земли, и ее распределения по широте и по сезонам.

Междисциплинарная задача

Перевод переменной инсоляции в климат сложен и включает сопряженные системы циркуляции атмосферы и мирового океана, связанные изменяющимся распространением земли и моря. Однако Perlmutter и Matthews (1990) смогли вывести некоторые общие принципы, с прогнозной ценностью, климатических изменений в шкале времени Milankovitch. По современным климатическим моделям они распознали 11 субширотных поясов от экватора до обоих полюсов, каждый с отличительной последовательностью климатических фаз, обоснованной типичным циклом инсоляции. Аналогично, область широт, типичных для юга Центрального Грабена (25-35° северной широты) в триасовом периоде могла испытать температурные изменения от тропического до умеренного, и изменения климата по влажности от засушливого до субгумидного. Кроме того, последовательность климатических фаз, возможно, изменилась, поскольку исследуемая область дрейфовала на север, приблизительно от 25° с. ш. в начале триасового периода приблизительно к 35° с. ш. в конце периода.

Изменение климата будет оказывать существенное влияние в условиях континентальный бассейн / континент через вековые изменения базиса эрозии, вызванные изменениями влажности и, следовательно, характера осаднения. Смена климата в триасовом периоде от засушливого к субгумидному, предсказанная для Центрального Грабена, как полагают, оказала большое влияние на аккомодацию из-за подъема и падения базиса эрозии. Точно так же изменение климата воздействует на тип системы разгрузки и водосбора (например, сильноизвилистая или слабоизвилистая). Совместное действие этих и других параметров отвечает за характер откладываемых отложений. В аллювиальной среде осаднения низкий уровень базиса эрозии при минимуме влажности, вероятно, будет представлен отсутствием осадков или даже эрозией, в то время как высокое положение базиса эрозии при максимуме влажности может быть представлено водосборной площадью или озерным осаднением, если уровни грунтовой воды поднимаются достаточно высоко. Простая модель предсказанных изменений представлена в таблице 2.

Таким образом, в простом цикле перехода от низкой влажности к высокой и обратно, мы можем предсказать следующие осадочные комплексы: (1) отсутствие осадконакопления или даже базис эрозии, (2) более низкая часть, характеризующаяся песчаными аллювиальными отложениями с отпечатками каналов, (3) явление наводнения, где уровень базиса эрозии растет и достигает некоторого критического уровня, затем (4) интервал отложений, в которых преобладают сланцы, представляющих водосборную площадь или озеро.

	Humidity	Baselevel	Fluvial Response
1	Minimum	Low	Non-deposition / erosion / no permanent record
2	Increasing	Rising	Channelized fluvial deposits (sand-grone)
3	Increasing	Near ground level	"Flooding"
4	Maximum	High	Unconfined floodplain or lacustrine deposits (shale-prone)
	Decreasing	Falling	Temporary deposition / removed by erosion

Табл. 2. Отклик аллювиальной системы на циклическое изменение влажности, который предсказан для триасового интервала исследуемой области.

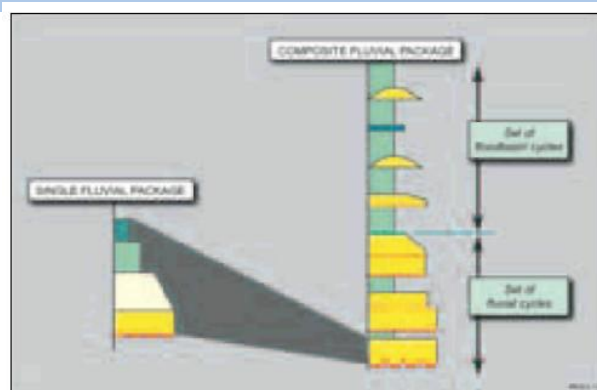


Рис. 2. Прогнозная аллювиальная колонка, образованная в результате сложного цикла влажности.

Вследствие сложной природы входной функции инсоляции, вышеупомянутая последовательность будет повторяться в нескольких перекрывающихся шкалах. Долговременная основная или «ведущая», климатические циклы будут иметь кратковременные второстепенные «ведомые» циклы, наложенные на них; наложенные циклы будут подобны по характеру, но их точное представление будет зависеть от их положения на основном цикле. Рис. 2 показывает, как можно предсказать наложенность ведомых циклов, каждого с песчанистой нижней частью и сланцеватой верхней частью, на долговременный основной цикл. Заметьте, как для основного и наложенного циклов предсказаны (а) резкая, возможно, эрозионная поверхность и (б) явная поверхность «наводнения». Такая модель могла быть более сложной, если бы при климатическом минимуме проявилась оловая активность и на протяжении влажных периодов образовались эвапориты (Yang и Nio, 1993).

Извлечение и применение сигнала климатического изменения

Модель последовательности, полученная выше, не будет применима одновременно ко всем частям резервуара: фактическая последовательность изменится согласно локальным условиям накопления осадка и другим факторам. Последовательность изменений климата, тем не менее, будет такой же для всех областей в пределах одного климатического пояса. Поскольку изменение климата, в конечном счете, регулируется сложной формой волны функции инсоляции, то оно представляет волновые свойства (длину волны, амплитуду, фазу) стратиграфического отклика, который мы стремимся использовать. Каротажные диаграммы, бывает, содержат идеальную комбинацию свойств для этого подхода, особенно те, которые реагируют, прежде всего, на фацию отложений, типа каротажа на основе естественного гамма-излучения (ГК):

(1) Они «представляют» геологию как серию измерений полностью реальной физической величины — смещение, связанное с измерением, невозможно, поскольку измеряют на обнажениях или на выбуренных и керновых данных.

(2) Они соответствуют тем требованиям «последовательного» анализа, чтобы иметь одинаковый шаг дискретизации относительно оси измерения (которой в данном случае является скважинная глубина).

Междисциплинарная задача

Эти свойства открывают данные каротажной диаграммы для методов спектрального анализа (Nio и др., 2006). Спектральные аналитические методы, такие как быстрое преобразование Фурье, стремятся представить составную волну в виде суммы множества простых (синус, косинус) волн. При этом мы ожидаем существенную неоднородность стратиграфии, энергетический спектр каротажной кривой большого стратиграфического интервала вряд ли будет полезен. Более интересен поиск *изменений* спектральной составляющей данных, поскольку это изменение, предсказываемое моделью климатической стратиграфии. Мы развили (1) метод, который преобразовывает типичную каротажную кривую, типа ГК в кривую изменения спектра, и (2) ряд правил для обработки этих кривых с целью выполнения стратиграфического анализа данной последовательности. Много исследований показали, что изменения, выделенные анализом формы сигнала каротажных диаграмм, всегда:

- Показательны в терминах вертикальной литофациальной вариации (то есть они связаны с явными изменениями в форме каротажных диаграмм, записанных прибором на кабеле)
- Обычно расположены на шкале времени $10^4 - 10^5$ лет (то есть они находятся в диапазоне волн Milankovitch). Следовательно, считают, что они контролируются, прежде всего, климатом, который является внешним фактором по отношению к системе отложения. Поэтому прогнозируется, что параллельные изменения, выделенные в различных скважинах в той же области, представляют почти синхронные события и интервалы. Поскольку основные изменения климата происходят в шкале времени $10^4 - 10^5$ лет, конечная стратиграфическая классификация имеет потенциал для разложения соответственно небольших интервалов стратиграфической колонки.

Извлечение спектральной кривой более подробно описано в другом месте (см. Nio и др., 2005 и 2006). Также как и быстрое преобразование Фурье, используется спектральная оценка как в спектральном анализе максимальной энтропии (MESA). Для получения характеристик каротажных данных использовался фильтр прогноза погрешности. Затем оценивается погрешность между предсказанными и действительными значениями каротажной кривой для каждой короткой (~10 м) серии перекрывающихся окон данных. Погрешности прогноза после этого интегрируются по проанализированному интервалу, порождая кривую, которая представляет собой тренд спектральных свойств данных. Мы называем эту кривую спектральной трендовой кривой атрибута или INPEFA (Integrated Prediction Error Filter Analysis — интегрированный анализ с помощью фильтров прогноза погрешности). Рис. 3 («Долгосрочный INPEFA») показывает спектральную трендовую кривую, вычисленную для отложений триасового периода скважины 30/13-3.

INPEFA Feature	Mathematical Interpretation	Geological Interpretation
Positive Trend	↗	Shale-prone or "transgressive" trend
Positive Turning Point	<	Basinward rise - "flooding" surface
Negative Trend	↘	Sand-prone or "regressive" trend
Negative Turning Point	>	Low basinward - possible erosion surface - new influx of coarse clastics

Табл. 3. Интерпретация трендов и поворотных пунктов INPEFA для аллювиальных условий.

Как правило, спектральная трендовая кривая воспроизводит вариации коротковолновой исходной кривой ГК, но они теперь наложены на более длинные и более короткие тренды данных: эти тренды хорошо отображаются при построении кривой преобразования INPEFA в более широкой области, чем обычно (рис. 3). Тренды могут быть математически объективно обработаны как интервалы, в которых действительные значения ГК либо постоянно завышаются, либо или постоянно занижаются. Геологическая и климатическая стратиграфические интерпретации трендов больше зависят от контекста; сводка в табл. 3 приведена для речных аллювиальных условий осадконакопления триасового периода исследуемой области, и могла бы выглядеть по-другому для других условий осадконакопления.

Обратите внимание на большую роль точек перелома в скважинной корреляции, на которых изменяется тренд кривой INPEFA:

- Области положительных значений тренда представляет переход от условий осадконакопления с преобладанием песков к относительно бедным песками условиям, и, при соответствующих условиях, могут быть интерпретированы как поверхности наводнения. При обнаружении в других скважинах, такое изменение тренда может быть расценено как маркировка коррелируемой поверхности, которую мы называем положительной граничной поверхностью (ППП).
- Области отрицательных значений тренда представляет более или менее резкий приход песка (очень резкое появление может говорить о более важной границе), возможно накопленной на поверхности размыва. При обнаружении в других скважинах, такое изменение тренда может быть расценено как отрицательная граничная поверхность (ОГП).

Коррелируемые изменения тренда могут использоваться для определения границ стратиграфических комплексов. Обратите внимание, что тренды кривых INPEFA эквивалентных стратиграфических комплексов могут изменяться между скважинами, вследствие латеральных фациальных вариаций. Распознав основные коррелируемые точки излома кривой INPEFA, мы можем улучшить конечную классификацию, перезапуская вычисление INPEFA для более коротких интервалов данных и, особенно, для интервалов между точками излома первого порядка. Пример скважины, для которой подразделение комплексов велось таким способом, приведен на рис. 3. Функция INPEFA была сначала вычислена для всего триасового интервала и посредством интерактивной корреляции между другими исследуемыми скважинами, была выполнена классификация первого порядка (черная кривая INPEFA).

Повторный запуск INPEFA для каждого выделенного комплекса (цветные кривые INPEFA) помогает подтвердить границы первого порядка, повышая детальность каждой пачки, а также может использоваться для разбиений более высокого порядка благодаря обычно более высокой амплитуде короткопериодной кривой INPEFA по сравнению с длиннопериодной кривой INPEFA. В примере скважины 30/13-3 важная ОГП встречается на глубине приблизительно 4740 м. Эквивалентные поверхности в других скважинах имеют только вторичное значение: как следствие, граница в

скважине 30/13-3 получает статус вторичной граничной поверхности.

Как и в других методах стратиграфической классификации, обычно можно разбивать комплексы на два или больше иерархических уровня. Мы используем простую численную систему обозначений для маркировки комплексов и их подкомплексов: в данной статье мы выделили только комплексы первого порядка от Tr1000 до Tr7000. Дальнейшие подразделения Tr1000 обозначались бы как Tr1100, Tr1200 ..., подразделения Tr1100 были бы обозначены как Tr1110, Tr1120 и так далее. В нашем исследовании были выделены два комплекса более высокого порядка, однако они не представлены в данной статье.

Стратиграфические комплексы

Анализ CycloLog позволяет нам разбить триасовую колонку исследуемой области на семь больших комплексов, обозначенных метками от Tr1000 до Tr7000 от подошвы до кровли триасовой пачки. В нашем исследовании были выделены два комплекса более высокого порядка, однако они не представлены в данной статье. Каждый из этих комплексов задан границей поверхности подошвы и поверхностью эрозии, являющейся подошвой для вышележащей толщи. Эти крупные комплексы по результатам интерпретации являются почти синхронными по исследуемой области. Заметьте, что новая стратиграфическая схема условна и (до настоящего времени) опирается только на скважинные данные.

Ни одна из исследуемых скважин не прошла полностью все крупные комплексы. Только две скважины 30/12b-3 и 22/24b-4Z проникли в Zechstein (Пермский период). Скважина 30/13-3 (рис. 3) прошла через комплексы от Tr3000 до Tr7000, с довольно четкой моделью INPEFA-GR для всех комплексов. Скважина 30/7a-7 (рис. 4) характеризуется хорошим, почти полным проникновением в комплексы Tr1000 и Tr2000.

Обсуждение

Семь комплексов первого порядка, выделенных по новому методу, позволяют понять стратиграфические зависимости и латеральные фациальные вариации триасовых отложений исследуемой области. Невозможно непосредственное сравнение наших результатов с предыдущими схемами классификации, нет простой зависимости между выделенными нами комплексами и литостратиграфически и сейсмостратиграфически выделенными единицами. Пример значительных расхождений приведен на рис. 5, где приводится сравнение нашей корреляции по двум скважинам с опубликованной литостратиграфической корреляцией. В целом хорошая корреляция длиннопериодных кривых INPEFA усиливается исследованием короткопериодных кривых INPEFA, вычисленных для каждого выделенного комплекса первого порядка. Характер отдельных комплексов, так же как и схожесть их очередности, оставляет нам небольшую долю сомнения в том, что наша корреляция является правильной. Литостратиграфическая корреляция, практически предполагающая отсутствие перекрытий между триасовыми слоями в двух скважинах, была подтверждена биостратиграфическими данными Goldsmith и др. (1995). В анализе Goldsmith, очевидный конфликт был разрешен следующим образом: глубины отбора бокового керна, датированного средним триасом, из скважины 30/7а-9 (близко к 30/7а-4А) были

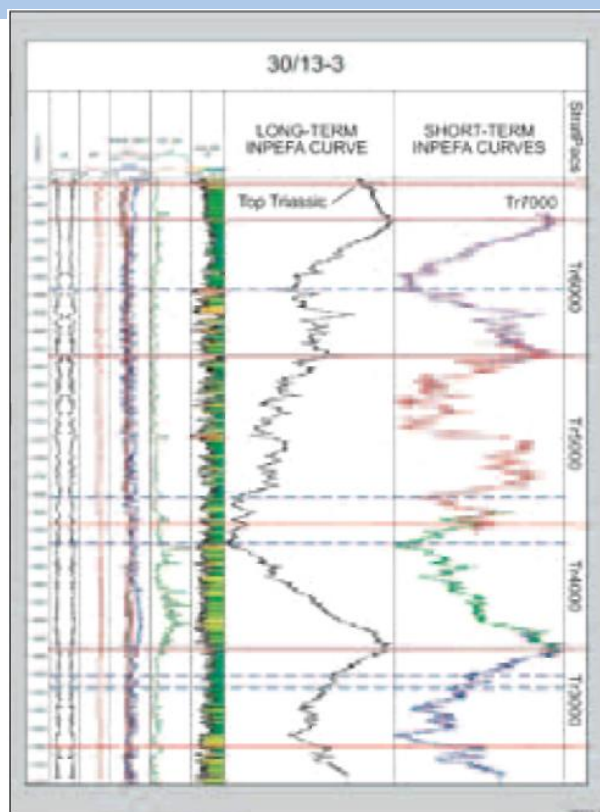


Рис. 3. Скважина 30/13-3, с кривыми INPEFA, вычисленными для всего (через который прошла скважина) триасового интервала («длиннопериодная кривая INPEFA») и отдельно для выделенных стратиграфических комплексов первого порядка («короткопериодные кривые INPEFA»). Красная волнистая кривая соответствует верхнему триасу. Горизонтальные красные линии показывают границы комплексов; синие пунктирные линии — коррелируемые поверхности затопления. Литофациальные вариации представлены кривой ГК, изменяющейся от красного (низкие значения) к синему цвету (высокие значения). Обращайтесь также к тексту.

признаны в процессе интерпретации как неправильные в разрезе, который был впоследствии интерпретирован как верхний триас. Если датировки среднего триаса для скважины 30/7a-9 на самом деле правильно расположены, то есть существенно меньше различий с нашими результатами. В других скважинах, кровля комплекса Julius Mudstone была по-разному пикирована на основе наших комплексов Tg3000 (22/30a-2), Tg4000 (22/24a-1), середине Tg4000 (30/12b-2) и нижней части Tg5000 (30/7a-8), проявляя сильную нестабильность этой литостратиграфической границы.

В области Marnock комплекс с преобладанием сланцев, неофициально называемый Marnock Shale, почти всюду использовался как маркирующий горизонт. В скважинах 22/24a-1 и 22/24b-4Z этот интервал совпадает с нашим комплексом Tr3000 (рис. 4). В нескольких километрах к юго-западу, в скважине 22/30a-6, McKie и Audretsch (2005) выделили кровлю Marnock Shale на основе нашего Tr2000, на два комплекса ниже эквивалентного горизонта в скважине 22/24b-4Z. Хотя они полагают, что могут проследить Marnock Shale на сейсмических данных (личные комментарии Т. McKie), характер кривых INPEFA четко подтверждает нашу

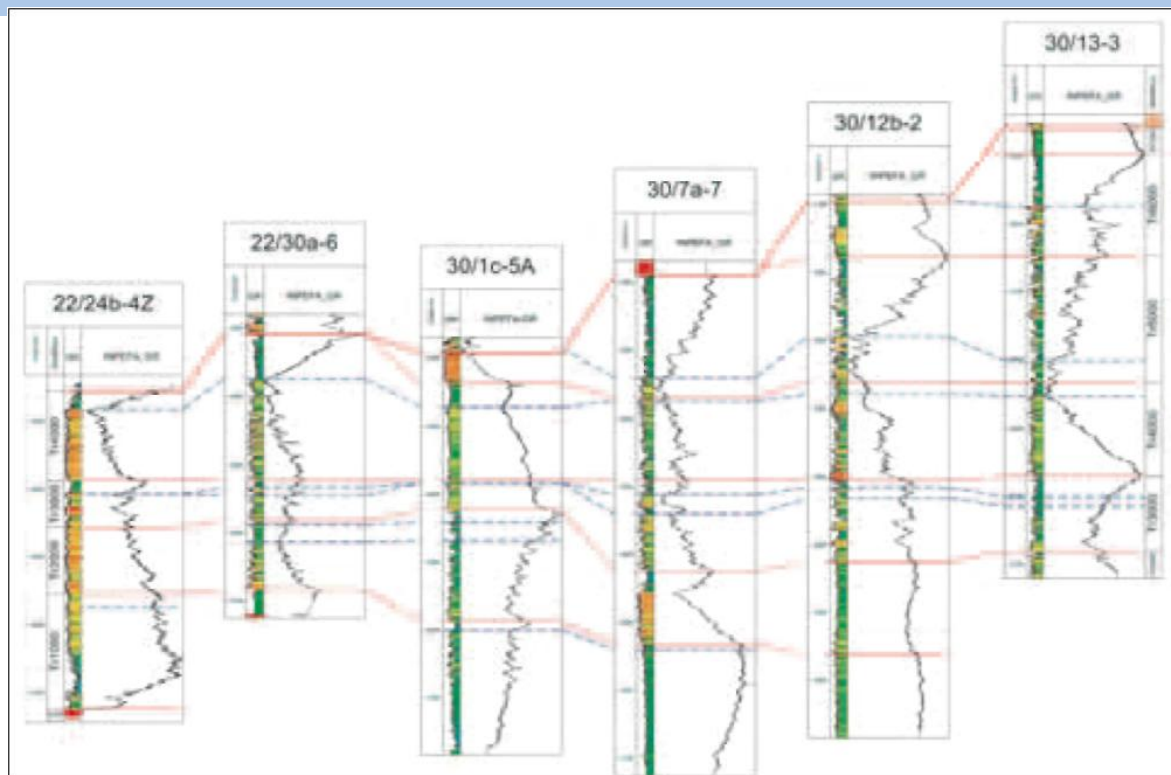


Рис. 4. Панель корреляции по шести скважинам, с северо-запада (Egret, 22/24) к юго-востоку (Josephine, 30/13). Литофациальные вариации представлены кривой ГК, изменяющейся от красного (низкие значения) к синему цвету (высокие значения). Широкая область каждой скважины содержит кривую INPEFA, полученную по кривой ГК и вычисленную для всего (прошедшего скважиной) триасового интервала. Красная волнистая кривая соответствует верхнему триасу. Горизонтальные красные линии показывают границы комплексов; синие пунктирные линии — коррелируемые поверхности затопления. Стратиграфические комплексы, выделенные в данном исследовании — от Tr1000 (внизу) до Tr7000 (вверх). Скважины произвольно подвешены на подошве комплекса Tr4000.

корреляцию (см. рис. 4). Дальнейшие расхождения должны быть адресованы к детализированным биостратиграфическим и сейсмическим корреляциям.

Было замечено различными авторами, что кривые ГК для триасового периода центральной части Северного моря могут содержать аномальные значения из-за присутствия полевого шпата в некоторых песчаниках, и из-за ангидритового цемента некоторых сланцев. Это может привести к более высоким, чем обычно, значениям кривой ГК для песков, и более низким, чем обычно, значениям для сланцев. Имея доступ к кривым спектрального ГК для некоторых (но не всех) из исследуемых скважин, мы могли экспериментировать с кривыми INPEFA, полученными отдельно по кривым ГК для K, Th и U, и отношениями между ними. В то время как эти кривые INPEFA обязательно отличаются от тех, которые получены по суммарной кривой ГК, мы смогли убедиться в том, что нам удалось распознать коррелируемые тренды и точки излома без обращения к кривым спектрального ГК. Важно знать, что кривая ГК не используется просто для дифференциации литологии (песок или сланец), поскольку информация, получаемая преобразованием INPEFA, содержится в спектральных (т. е. длина волны, амплитуда, фаза) параметрах исходной каротажной кривой.

Читатель должен быть в курсе, что (из-за большой длительности представленного в статье исследования) мы в нашем исследовании не принимаем во внимание тектонические процессы. Тектонические процессы действуют на более крупных временных шкалах, чем управляемые инсоляцией изменения климата. В терминах их воздействия на стратиграфию, управляемые климатом модели можно рассматривать как наложенные на модели, соответствующие тектоническим изменениям, которые имеют большую длительность. Повсюду увеличение частиц отложений в данной области (поскольку область становится более насыщенной песком) может вполне быть результатом роста тектонических воздействий, однако короткопериодные вертикальные литофациальные вариации (что проявляется в изменениях кривых и моделей INPEFA), прежде всего, вызваны климатическими изменениями. Вполне возможно, что некоторые из важных изменений, которые мы видим на длиннопериодных кривых INPEFA, частично вызваны тектоническими изменениями; однако очевидно синхронная природа главных изменений нами приписывается процессам, связанным с орбитальными сдвигами.

Междисциплинарная задача

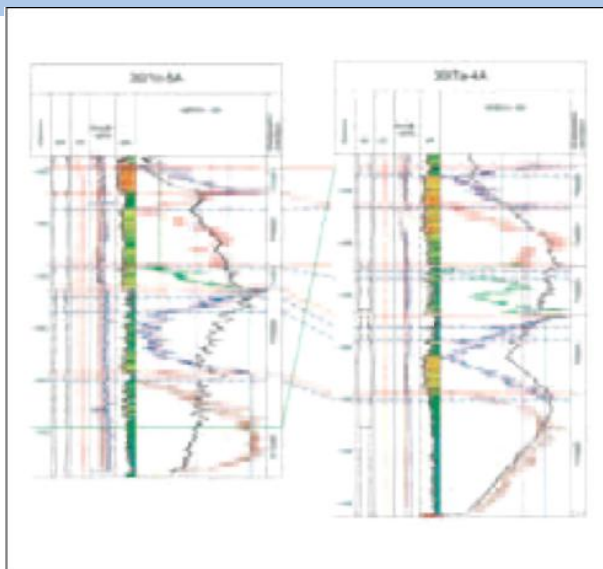


Рис. 5. Корреляция по скважинам 30/1c-5A и 30/7a-4A. Красная волнистая кривая соответствует верхнему триасу. Горизонтальные красные линии показывают границы комплексов; синие пунктирные линии — коррелируемые поверхности затопления. Длиннопериодные кривые INPEFA (черные) и короткопериодные кривые (цветные) INPEFA показаны вместе для одного участка. Зеленая линия соединяет кровлю Julius Mudstone Member, выделенную Goldsmith и др. (1995, 2002) в этих двух скважинах.

Выводы

Рассмотрение климатических изменений в качестве основного фактора вертикальных литофациальных вариаций позволяет выполнить времяемкую стратиграфическую классификацию на основе стандартной чувствительной к фациальным изменениям каротажной диаграммы, например ГК. Преобразование INPEFA (спектральный тренд) — ключ к распознаванию стратиграфических изменений, вызванных сменой климата. Мы использовали этот подход для выведения полностью нового стратиграфического метода для исследования триасовых интервалов скважин, пробуренных на юге Центрального Грабена Великобритании. Хотя мы привели только выделенные нами стратиграфические комплексы первого порядка, конечно возможно подразделение более высокого порядка и корреляция, и на следующем шаге будет логично применение нашего метода к остальной части резервуара и к внешней, по отношению к исследуемой, территории. При аккуратном применении нашего нового стратиграфического метода, можно получать новые сведения там, где другие методы дают неоднозначные результаты или результаты с низким разрешением.

Благодарность

Каротажные диаграммы и другие данные для данного исследования были предоставлены IHS Energy, из их базы данных соответствующих скважин Великобритании. Мы благодарим IHS Energy за разрешение на публикацию данной статьи, которая является результатом совместного исследования ENRES International и IHS Energy. Хорошие корреляционные панели были получены с использованием программного обеспечения CycloLog (ENRES International).

Ссылки на литературу

- Goldsmith, P.J., Hudson, G., and Van Veen, P. [2002] Triassic. In Eds. D. Evans, D., Graham, C., Armour, A., and P. Bathurst, P. *The Millennium Atlas: Petroleum Geology of the Central and Northern North Sea*. Geological Society, London, 105-127.
- Goldsmith, P.J., Rich, B., and Standing, J. [1995] Triassic correlation and stratigraphy in the South Central Graben, UK North Sea. In Boldy, S. (Ed.) *Permian and Triassic Rifting in Northwest Europe*, S. Special Publication, Geological Society, London, 123-143.
- McKie, T. and Audretsch, P. [2005] Depositional and structural controls on Triassic reservoir performance in the Heron Cluster, ETAP, Central North Sea. In Doré, A.G. and Vining, B.A. (Eds.) *Petroleum Geology: North West Europe and Global Perspectives. Proceedings of the Sixth Petroleum Geology Conference*. Geological Society, London, 285-297.
- Nio, S. Djin, Brouwer, J., Smith, D.G., De Jong, M., and Böhm, A. [2005] Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs. *First Break*, **23**, 4, 71-75.
- Nio, S. D., Böhm, A.R., Brouwer, J.H., De Jong, M.G.G., and Smith, D.G. [2006] *Climate stratigraphy, principles and applications in subsurface correlation*. EAGE Short Course Series 1, 130 pp.
- Penge, J., Munns, J.W., Taylow, B. and Windle, T.M.F. [1999] Rift-raft tectonics: examples of gravitational tectonics from the Zechstein basins of northwest Europe. In Fleet, A.J. and Boldy, S.R. (Eds.) *The Petroleum Geology of NW Europe: Proceedings of the Fifth Conference*. Geological Society, London, 201-213.
- Perlmutter, M.A. and Matthews, M.D. [1990] Global cyclostratigraphy - a model. In Cross, T.A. (Ed.) *Quantitative Dynamic Stratigraphy*. Prentice Hall, 233-260.
- Pooler, J. and Amory, M. [1999] A subsurface perspective on ETAP — an integrated development of seven Central North Sea fields. In Fleet, A.J. and Boldy, S.R. (Eds.) *The Petroleum Geology of NW Europe: Proceedings of the Fifth Conference*. Geological Society, London, 993-1006.
- Stewart, S.A. and Clark, J.A. [1999] Impact of salt on the structure of the Central North Sea hydrocarbon fairways. In Fleet, A.J. and Boldy, S.R. (Eds.) *The Petroleum Geology of NW Europe: Proceedings of the Fifth Conference*. Geological Society, London, 179-200.
- Yang, C.S. and Nio, S.D. [1993] Application of high-resolution sequence stratigraphy to the Upper Rotliegend in The Netherlands offshore. In Weimer, P., and Posamentier, H. (Eds.) *Siliciclastic Sequence Stratigraphy - Recent Developments and Applications. American Association of Petroleum Geologists Memoir 58*, 285-316.