

ОКЕАНСКИЕ АНОКСИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ МЕЛОВОГО ПЕРИОДА И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ОКРАИНАХ МАТЕРИКОВ

А.И. Конюхов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Меловой период был отмечен не только господством теплого климата, обширными трансгрессиями моря и широким распространением карбонатных отложений, но также формированием богатейших нефтематеринских свит. Как ранне-, так и поздне меловая эпохи ознаменовались несколькими океанскими аноксическими событиями (ОАЕ) глобального и регионального масштаба, сопровождавшимися накоплением осадков, обогащенных органическим веществом и значительными сдвигами отношений стабильных изотопов С, О и Sr. Разные аспекты этих событий рассматриваются в огромном количестве статей, опубликованных за последнее время в крупнейших научных изданиях. К сожалению, их роль в формировании нефтематеринских свит осталась за пределами научного анализа. Между тем, именно с меловым периодом было связано широчайшее распространение черных глин и карбонатных осадков, обогащенных органическим веществом, в седиментационных бассейнах континентальных окраин. Речь идет об окраинах в западном и центральном рукавах океана Тетис, в южных районах Атлантики, а также на окраинах Южно-Американского континента, обращенных в настоящее время к Карибскому морю и Тихому океану. Среди нефтематеринских формаций мелового возраста наибольшую роль в генерации жидких и газообразных углеводородов (УВ) сыграли отложения свит Ханифа, Гарау, Каждуди, Ахмади мембер и Гурпи в бассейне Персидского залива. Огромные объемы УВ были продуцированы в карбонатных породах формации Ла Луна, получивших широчайшее распространение в Маракаибском, Восточно-Венесуэльском, Путумайо и других бассейнах Южной Америки. В этой связи следует упомянуть и черные глины и мергели свит Лагоа Фейя и Букомази в нижнемеловых разрезах Бразилии, Анголы, Камеруна и Габона. Соотношению этих образований и черных глин, аккумуляция которых происходила в эпохи ОАЕ, посвящена данная статья.

Ключевые слова: океанские аноксические события, меловый период, нефтематеринские свиты, бассейны континентальных окраин, черные глины

DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.6>

Для цитирования: Конюхов А.И. Океанские аноксические события мелового периода и их роль в формировании нефтематеринских отложений на окраинах материков. *Георесурсы*. 2017. Спецвыпуск. Ч. 1. С. 43-55. DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.6>

Раннемеловая эпоха

С раннемеловой эпохой связано несколько эпизодов широкого распространения черных глин и других осадков с высоким содержанием органического вещества (ОВ) как в шельфовых, так и в глубоководных морских обстановках. Самое раннее из них – океанское аноксическое событие (Oceanic Anoxic Event, ОАЕ) «Faraoni», приурочено к позднему готериву, следующие три – к апту и альбу: ОАЕ 1a или Селли, ОАЕ 1b или Пакье, а также ОАЕ 1c и 1d. С двумя из них связаны высоко амплитудные (>1,5‰) аномалии изотопного отношения углерода (Рис. 1). Эти интервалы – поздневаланжин-готеривский, раннеаптский, позднеаптско-раннеальбский и позднеальбский, были отмечены не только широким распространением в морских и океанских водоемах черных глин, но также сокращением площади развития карбонатных платформ.

ОАЕ 1a (раннеаптское аноксическое событие). Это событие было самым ранним из наиболее значимых интервалов масштабной аккумуляции черных глин в меловое время, приуроченной, в основном, к обстановкам континентальных окраин в океане Тетис и центральной части современной Атлантики (Рис. 2). В разных регионах оно сопровождалось проявлениями аноксии в донных осадках, значительными изменениями в структуре карбонатного наннопланктона, известными как *pannosonid crisis*, а также

высокой скоростью вымирания не только карбонатного, но и кремнистого планктона (Leckie et al., 2002). Анализ изотопных данных указывает на значительное увеличение (на 8°C) температуры поверхностных вод в океане, за которым последовало ее резкое охлаждение (Ando et al., 2009). Эта короткая по длительности отрицательная аномалия, которая достигает в морских карбонатах 3‰, а в C_{org} осадков – 4-5‰, была вызвана поступлением в гидро- и атмосферу CO_2 с повышенным содержанием легкого изотопа ^{12}C .

Первые свидетельства аноксического океанского события ОАЕ 1a были обнаружены в Ливелло Селли. В этом, одном из наиболее полных разрезов раннеаптских отложений в Италии на кривой $\delta^{13}C$ наблюдается резко выраженная отрицательная аномалия, отвечающая самой ранней фазе проявления ОАЕ 1a в Альпийско-Средиземноморском регионе. Выше фиксируется смещение в сторону положительных значений, нашедшее отражение как в карбонатных породах шельфового и глубоководного генезиса, так и в составе органической части пород. Содержание C_{org} в черных глинах, отложенных во время этого аноксического события, варьирует от 2 до 16%. Согласно одним исследователям, их аккумуляция была вызвана масштабным выбросом тепличных

газов во время излияний платобазальтов в районе Онтонг Ява на западе Тихого океана (Jahren et al., 2002), тогда как по мнению других – разрушением газогидратного слоя (Beering et al., 2002).

Разрез меловых отложений в местечке Ротер Саттель, расположенном в предгорной зоне Швейцарских Альп, сложен известняками и мергелями аптраннетуронского возраста, которые включают несколько пластов осадков, обогащенных ОВ. Известняки изобилуют раковинками планктонных фораминифер, наряду с которыми встречаются радиолярии (главным образом в кремнистых разностях) и в небольшом количестве кальциферы, спикулы губок, пластинки иноцерамов, раковины моллюсков и бентосных фораминифер. По всему разрезу в рассеянной форме присутствуют зерна фосфоритов и глауконита. Более крупный карбонатный материал, вероятно, был принесен в глубоководную часть бассейна из мелководных обстановок или в процессе эрозии подводного склона. Отдельные прослои известняков, которые можно отнести к грейнстоунам, по-видимому, имеют гравитационный генезис и могут рассматриваться в качестве дистальных турбидитов. В прослоях известняков, обогащенных органикой, наблюдаются кристаллы пирита, зерна фосфоритов и кварца с каемками обрастания вокруг них. Однако наибольшие их концентрации фиксируются в прослоях мергелей, окрашенных в темно-серый или черный цвет и изобилующих раковинками радиолярий и диатомей. Если в известняках содержание $C_{орг}$ не превышает 0,5%, то в черных мергелях оно варьирует от 1 до 6,75%. Значения водородного индекса в них достигали 255 мг УВ/г $C_{орг}$ (Strasser et al., 2001).

В разрезе Сизмон на севере Италии значительный сдвиг на кривой $\delta^{13}C$ в сторону отрицательных значений (1,3‰) фиксируется лишь в органической части черных глин, где вместе с остатками морских организмов присутствует примесь наземной растительности. В прослоях известняков из того же интервала толщиной 32 см это смещение выражено существенно слабее, что, по мнению С. Мехая с соавторами, не может свидетельствовать в пользу гипотезы о разложении газогидратов в глубоководной зоне океана, так как в этом случае нарушение баланса CO_2 нашло бы отражение как в карбонатах, так и в ОВ донных осадков (Mehay et al., 2009). В разрезе, вскрытом скважиной у г. Пиоббико, тому же событию отвечает пласт черных глин, которые содержат пиритовые

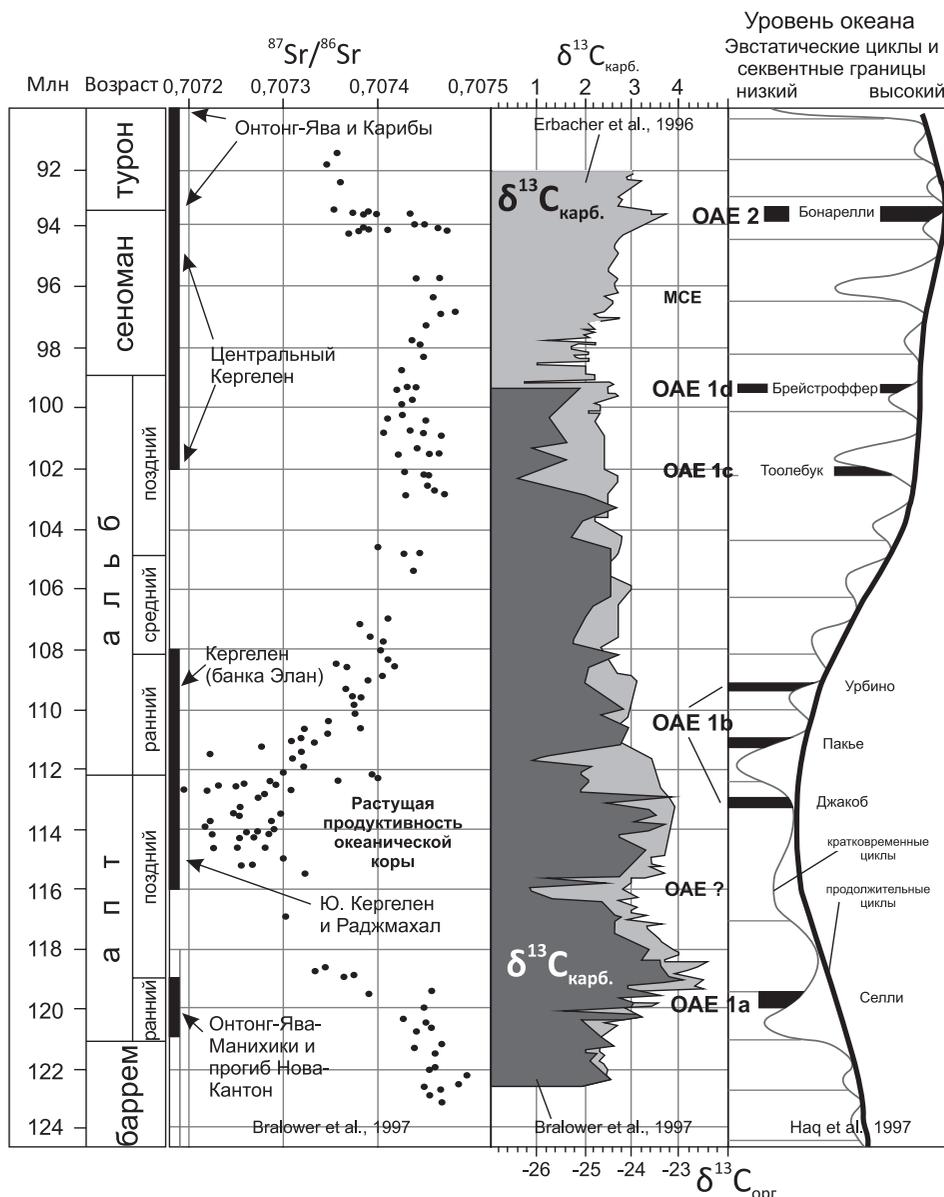


Рис. 1. Основные интервалы, отмеченные в середине мелового периода вспышками вулканизма и аноксическими событиями в океане (ОАЕ), которые сопровождалась аккумуляцией черных глин и других отложений с высоким содержанием ОВ, по (Leckie et al., 2002).

конкреции, раковины радиолярий и кости рыб. На них залегают глинистые известняки и мергели серого и зеленовато-серого цвета (3 м толщиной), перекрытые пачкой красноцветных карбонатных пород. Интервал времени, на протяжении которого происходил переход от аноксии к условиям, характеризовавшимся насыщением придонных вод кислородом, составил около 1,2 млн лет (Wang et al., 2011).

Большой интерес представляют результаты бурения, проведенные в разных частях Тихого океана. На подводном поднятии Шатского в СЗ части Тихого океана (рейс 198 ОДП) обогащенные ОВ осадки приурочены к интервалу, сложенному микрозернистыми с обильными нанофоссилиями карбонатными осадками и кремнями баррем-сеноманского возраста. Обогащенными ОВ осадками – темно-коричневыми радиоляриевыми глинами и радиоляриевыми порцелланитами – здесь сложен прослой толщиной 45 см, отвечающий аноксическому событию ОАЕ 1а. В точке 1207 Б содержание $C_{орг}$ варьирует от 1,7 до 34% (максимальное 43%). Среди биомаркеров

преобладают стероидные соединения (стерены и стеролы), что характерно для обстановок с высоким уровнем биопродукции фитопланктона. Состав ОВ определяется компонентами водорослевого и бактериального генезиса (Dumitresku, Brassell, 2006).

В аптской части разреза меловых отложений, вскрытых бурением на вершине гайота Резолушн в районе Гавайского архипелага, Х. Дженкинс и П. Вильсон выделили два интервала, где карбонатные породы, представленные известняками (пак- и вакстоунами), содержат прослои глин, обогащенных органикой. Один из них залегает на рудистовых известняках в основании апта, другой – ближе к кровле на оолитовых известняках. С раннеаптским интервалом здесь связан резкий сдвиг на кривой $\delta^{13}\text{C}$ в сторону положительных значений, характерный для ОАЕ 1а. В ранне-меловую эпоху подводная гора Резолушн располагалась в экваториальном секторе Тихого океана, с которым связан высокий уровень продукции органостенного и кремнистого планктона (Jenkyns, Wilson, 1999).

Результаты исследований, проведенных в последнее время в южных районах Испании и Тунисе, показывают, что повышение концентрации CO_2 в эпоху ОАЕ 1а происходило постепенно в течение нескольких десятков, а может быть, и сотен тысяч лет. Оно не могло привести к резкому окислению поверхностных вод в океане и, следовательно, не было причиной кризиса карбонатного наннопланктона. Содержание CO_2 в атмосфере оставалось высоким на протяжении последующих 1,5 или 2 млн лет (Naafs et al., 2016).

ОАЕ 1б (конец апта – ранний альб). Это аноксическое событие было зафиксировано не только в наземных разрезах среднего мела, обнажающихся в разных областях Южной Европы (Франции, Германии, Австрии и Греции), но также в скв-х, пробуренных по программе ДСДП на подводных плато Мазаган и Блейк в центральной Атлантике. Самое раннее проявление этого события было зафиксировано в Воконтэнском бассейне на ЮВ Франции, где черные глины появляются в разрезе ниже границы апта и альба. Этот интервал, включающий верхнеаптские горизонты теперь известен как уровни Джакоб и Килиан. В составе ОВ этих черных глин с содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$ не выше 3,3% фиксируется высокая концентрация детритных компонентов наземного происхождения. ОВ в вышележащем горизонте нижнеальбских черных глин ($\text{C}_{\text{орг}}$ нередко более 8%) принадлежит ко II типу.

Полученные при изучении керна в лаборатории изотопные данные свидетельствуют о том, что аккумуляция черных глин происходила на фоне повышения температуры поверхностных вод в океане. Высокие температуры сохранялись на протяжении всего этого, довольно короткого (40-50 тысяч лет) аноксического события (Hofmann et al., 2008). Особое внимание исследователей привлекли специфические биомаркеры, которые были извлечены из ОВ этих глин. Дело в том, что в ряде случаев они были представлены моноциклическими изопреноидами, указывающими на архей, как на основной источник биомассы.

По данным электронной микроскопии кероген черных мергелей, на который приходится более 95% ОВ, образован тончайшими слоями, сложенными аморфными негидролизруемыми органическими компонентами. Определенные в них значения $\delta^{13}\text{C} = -15,5\text{‰}$ характерны

для липидов, находящихся в клетках архей. Использование хромато-масс спектрометрии позволило выявить присутствие в ОВ черных мергелей специфических соединений, которые являются основными компонентами клеточных мембран этих микроорганизмов. Согласно М. Кюйперсу с соавторами, более 80% органики, находящейся в изученных ими осадках, было продуцировано археями, которые могли обитать не только в осадках, но и в толще морской воды над ними (Kuipers et al., 2001).

Проведенные М.Пактон с соавторами исследования выявили свидетельства колонизации осадка микробами уже после его захоронения. Согласно полученным ими данным, темные включения в клетках микроорганизмов представлены неорганическими полифосфатами, которые накапливались ими для адаптации к менявшимся условиям в процессе уплотнения отложений. В клетках бактерий были также обнаружены каротеноиды, которые могли играть роль антиоксидантов, увеличивающих механическую прочность клеточной мембраны. Эти соединения способствовали сохранению бактериальных клеток в процессе их минерализации в течение длительного времени. Образование сложных полимерных соединений в составе микробных клеток могло способствовать сохранению ДНК бактерий, обитавших в меловых осадках. Как было установлено ранее, ДНК сохраняет устойчивость в клетках многих бактерий, существовавших в режиме «голодания» в течение длительного времени (Pacton et al., 2011).

В западных районах Греции распространены тонко-слоистые карбонатные отложения свиты Вигла, включающие пласты кремнистых пород, которые изобилуют раковинками радиолярий. В верхней части разреза свиты насчитывается 27 прослоев мергелей и глин, обогащенных ОВ ($\text{C}_{\text{орг}}$ – от 1 до 6%, водородный индекс – от 170 до 450 мгУВ/г $\text{C}_{\text{орг}}$). Они приурочены к «глинистой пачке Вигла», в которой преобладают кремнистые известняки альб-сеноманского возраста. В двух горизонтах черных мергелей и/или известняков, BS1 и BS2, содержание ОВ значительно выше – 28,5 и 44,5% соответственно. В битумоидной фракции, выделенной неполярными растворителями из черных мергелей ранне- и среднеальбского возраста, среди биомаркеров присутствовали соединения, которые свидетельствуют о высокой активности в период аккумуляции осадков архей (Kuipers et al., 2001).

ОАЕ 1с-d (средний и поздний альб). Процесс распада Гондваны завершился в конце альба-начале сеномана полным отделением Южной Америки от Африки. Ему предшествовали масштабные излияния подушечных лав в Центрально-Перуанском тропе, сопровождавшиеся отложением андезитовых туфов, кремней и черных битуминозных глин. За относительно короткий промежуток, в среднеальбское время, там сформировался комплекс вулканогенных и осадочных пород серии Занья мощностью более 6000 м. Пояс среднеальбских вулканитов протягивается в Перу на 500 км. Объемы выделившихся при этом тепла и парниковых газов были настолько велики, что вызвали глобальное потепление, известное как биосферное событие или ОАЕ 1с. С ним связывают установление аноксических условий на значительной площади морского дна в центральном секторе Атлантического океана и прилегающих районах океана Тетис.

При бурении в окрестностях г. Пиоббико в Италии была пройдена толща ритмичного переслаивания черных глин со светло-серыми мергелями, известняками и карбонатными глинами мощностью 150 м, в которых практически отсутствуют следы биотурбации, а содержание $C_{орг}$ варьирует от 0,1 до 1,5%. Прослой черных глин присутствуют как в нижне-, среднеальбском, так и в верхнеальбском интервалах разреза. При этом в верхнеальбском интервале (сегмент Амадеус), который отвечает аноксическому событию ОАЕ 1с, отчетливо проявлена цикличность, обусловленная изменениями орбитальных характеристик Земли по Миланковичу. Анализ кривой и распределения остатков наноплан-

ктона в породах указывают на то, что аккумуляция черных глин происходила в короткие интервалы господства более теплого климата. При этом, однако, не наблюдалось увеличения фертильности нанопланктона. В разностях осадков с невысоким содержанием ОВ встречается большое количество диноцист, тогда как в черных глинах фиксируется преобладание (более 90%) остатков пресноводных водорослей *Pediastrum*, *Scenedesmus* и *Tasmanitaceae*. Это свидетельствует о распреснении поверхностных вод, которое было вызвано увеличением речного стока, что, в свою очередь, способствовало усилению стратификации водной толщи в океане (Tiraboschi et al., 2009).

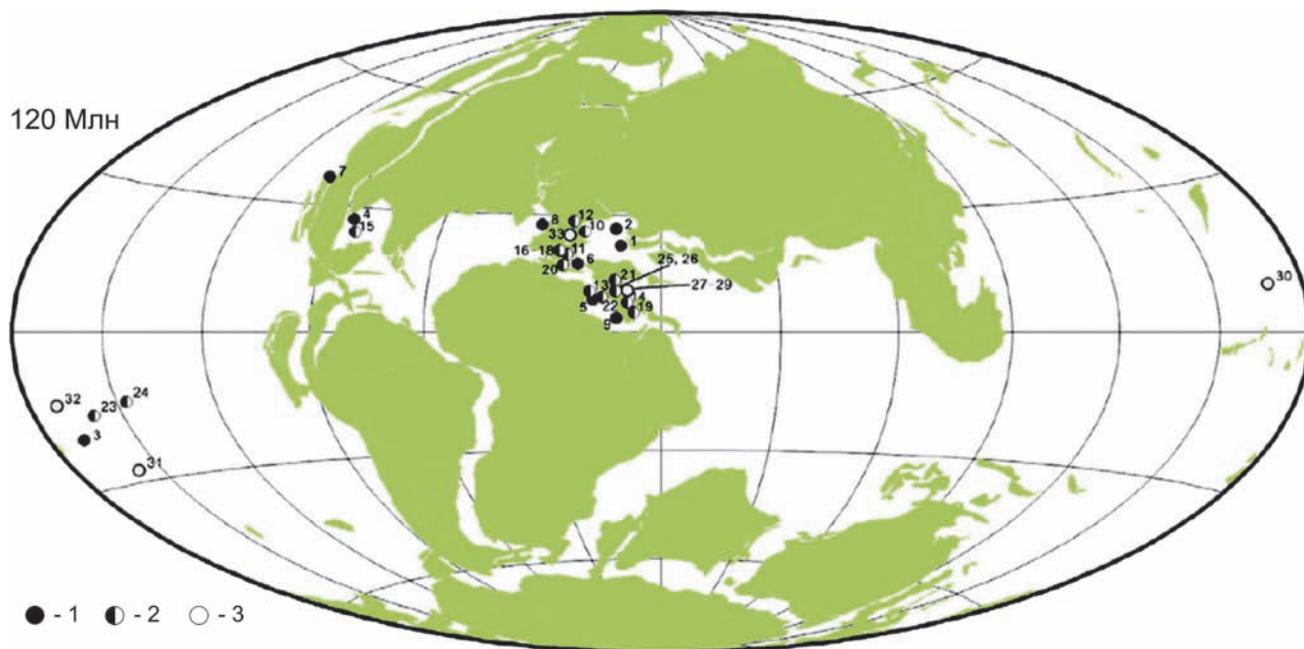


Рис. 2. Основные районы распространения черных глин в интервале ОАЕ 1а, по (Wang et al., 2011). 1-3 – черные глины с различным набором характерных признаков: определенный литофациальный состав, повышенное содержание $C_{орг}$ и позитивный сдвиг значений отношения $\delta^{13}C$: 1 – с полным набором признаков, 2 – с двумя из трех признаков, 3 – с одним из трех признаков

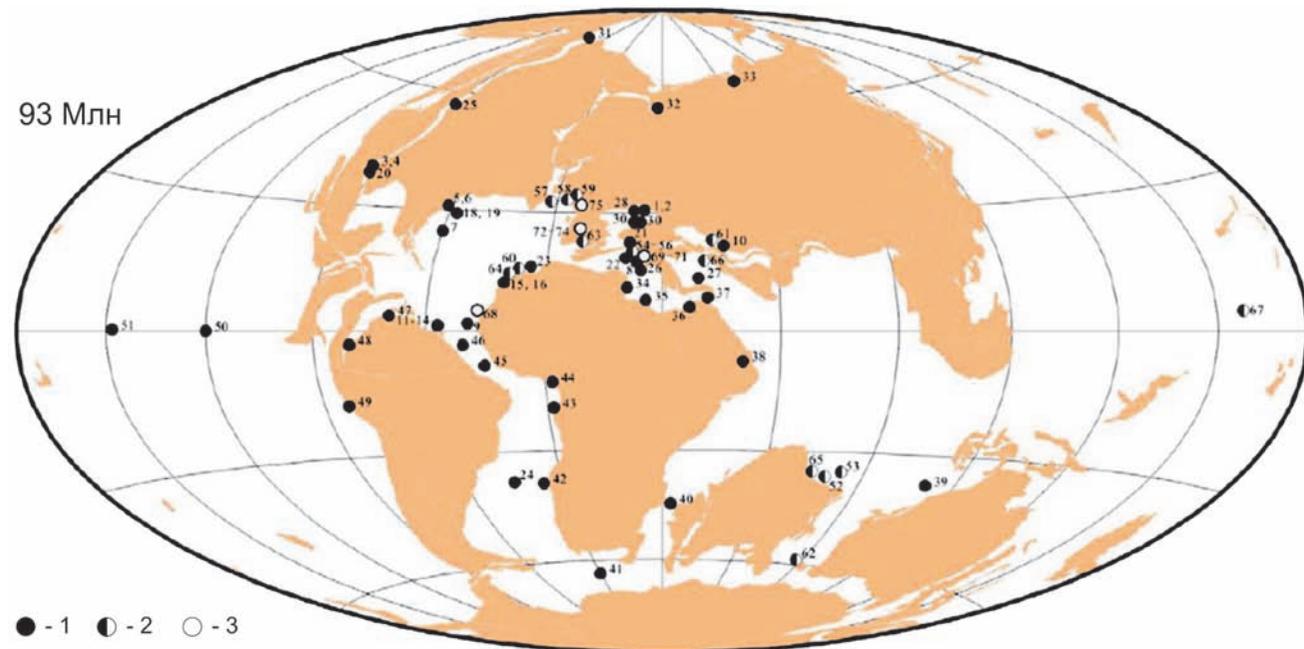


Рис. 3. Основные районы распространения черных мергелей (глин) в интервале ОАЕ 2, по (Wang et al., 2011). 1-3 – черные глины с различным набором характерных признаков: определенный литофациальный состав, повышенное содержание $C_{орг}$ и позитивный сдвиг значений отношения $\delta^{13}C$: 1 – с полным набором признаков, 2 – с двумя из трех признаков, 3 – с одним из трех признаков

В центральной части Атлантического океана в т. 1052 E и 1050 S при проведении глубоководного бурения была вскрыта толща верхнеальбских-нижнесеноманских осадков, сложенная переслаиванием черных глин и известняков. Согласно данным био- и циклостратиграфического анализов, эти осадки накапливались на значительных глубинах (около 1200 м) со скоростью 20 см/тыс.лет, что позволяет детально проследить процессы, протекавшие в эпоху OAE 1d. Благодаря высокой степени сохранности раковин планктонных и бентосных фораминифер, вместе с которыми находились раковины аммонитов и гастропод, сложенных арагонитом, удалось с высокой точностью определить в карбонатах изотопный состав углерода и кислорода и определить температуру поверхностных вод (SST) в океане того времени. Оказалось, что эта температура была существенно выше той, что наблюдается в водах современного океана. Полученные результаты дают основание полагать, что тепличный режим на нашей планете установился не в позднем сеномане, как считалось ранее, а в позднеальбское время (Norris, Wilson, 1998).

Позднемеловая эпоха

Вторая половина мелового периода была отмечена несколькими эпизодами аккумуляции черных глин (мергелей), среди которых наиболее масштабными являются среднесеноманский (MCE), сеноман-туронский (Bonarelli event, OAE 2) и коньяк-сантонский (средний коньяк – ранний сантон, 89-86 млн л.н.) интервалы времени (OAE 3). Последний длился около 3 млн лет, тогда как предыдущие менее 1 млн лет (Wagreich et al., 2004).

OAE 2 (сеноман-туронское аноксическое событие).

Аккумуляция осадков, с высоким содержанием ОВ в конце сеномана распространилась за пределы океана Тетис и центральной Атлантики во вновь открывшиеся океанические бассейны (Рис. 3). В черных глинах сеноман-туронского возраста, вскрытых при бурении на подводном плато Демерара в рейсе ОДП, значения $C_{орг}$ варьировали от 2,62 до 16,64%. По данным исследователей, работавших на борту «Оушен Резолушн», величина водородного индекса превышает 500 мгУВ/г $C_{орг}$, кероген принадлежит П-типу, а биомаркеры представлены гопанами и стеранами. Их высокие концентрации свидетельствуют о незначительной степени трансформации ОВ в диа- и катагенезе. Структурные и текстурные особенности глинистых и карбонатных осадков позднесеноман-сантонского возраста, развитых на СВ склоне плато Демерара, указывают на их накопление в мелководно-морских обстановках. В составе этой толщи выделяется пачка черных известковых глин мощностью 96,2 м, которые в высокой степени обогащены органическим материалом: от 7,76 до 16,99% $C_{орг}$. В составе ОВ черных глин преобладают остатки морских водорослей, а сами глины характеризуются высоким уровнем гамма-излучения.

При изучении 120 образцов из интервала разреза, отвечающего OAE 2, была установлена прямая зависимость между содержанием $C_{орг}$ (в диапазоне 8,9-33,4%) и площадью поверхности минеральных, в основном глинистых компонентов, представленных преимущественно смектитом. Сходимость результатов достигала 88-92%. По данным электронной микроскопии органические поликонденсаты, представленные в основном (до 90%)

аморфным материалом, образуют с глинистыми частицами органоминеральные агрегаты. При этом мельчайшие органические молекулы могут находиться в межслоевом пространстве разбухающих глинистых минералов. Формирование в раннем диагенезе органоминеральных агрегатов предотвратило окисление ОВ и его разложение микроорганизмами (Lohr, Kennedy, 2014).

Скважина, пробуренная недавно в местечке Вунсторф близ г. Ганновера (Германия), вскрыла верхнемеловые отложения, в сеноман-туронской части которых присутствует большое количество пластов и прослоев черных глин, чередующихся с известняками белого цвета, сложенными остатками карбонатного наннопланктона. Они выделяются в составе свиты Хессельгаль и накапливались на глубинах от 100 до 150 м в пределах обширной шельфовой платформы, простиравшейся на рубеже сеномана и турона от Британских о-вов до Русской плиты. Породы этой формации распространены в Вестфалии и Нижней Саксонии, где сменяются биокластовыми красноцветными известняками свиты Зельде. Эти карбонатные осадки отлагались на приподнятых участках дна. Аккумуляция черных мергелистых осадков, начавшаяся здесь на границе сеномана и турона, что фиксируется по сдвигу кривой $\delta^{13}C$ в сторону положительных значений (OAE 2-CIE), продолжалась и позднее, в раннем туроне. Содержание $C_{орг}$ в этом интервале нередко составляет 2,5%. Самый верхний прослой черных глин с содержанием $C_{орг}$ 1,8% залегает в разрезе у Вунсторфа в 33 м выше границы OAE 2 (Рис. 4) (Blumenberg, Wiese, 2012).

Комплексное исследование верхнесеноман-нижнетуронских отложений в соседнем Воконтэнском бассейне, обнажающихся в краевой части близ Понт Д'Иссоль на ЮВ Франции и содержащих многочисленные остатки нанофоссилий: фораминифер, радиолярий и цисты органических динофлагеллят, позволило уточнить условия формирования обогащенных ОВ осадков на разных этапах OAE 2. Для корреляции с разрезами из других регионов Европы использовались данные по биомаркерам в составе ОВ, содержанию CO_2 и палеотемпературам. Изученные отложения представлены карбонатной толщей циклического строения, сложенной гемипелагическими известняками и мергелями и включающей горизонты и отдельные прослои черных известковых глин (мергелей), известных как Niveau Thomel 1 и 2 (Рис. 5). Горизонты черных мергелей разделены пачкой светлых мергелей с прослоями пелагических известняков. Именно в этом интервале фиксируется наиболее выраженный позитивный сдвиг на кривой $\delta^{13}C_{карб}$. Он отвечает стадии похолодания, которое известно как Plenum cold event. С этим событием связано не только уменьшение температуры поверхностных вод, но также насыщение придонной воды кислородом, сделавшим возможным заселение морского дна бентосными организмами в тех районах Центральной Атлантики, где раньше накапливались черные глины (Jarvis et al., 2011).

Сопоставление материалов, полученных в Понт Д'Иссоль, с классическим разрезом сеномана и турона в Истборне (Англия) демонстрирует высокую степень корреляции изменений на кривых $\delta^{13}C$ в интервале СТВ (границы сеномана и турона), которая фиксируется на фоне разной конфигурации пластов черных мергелей

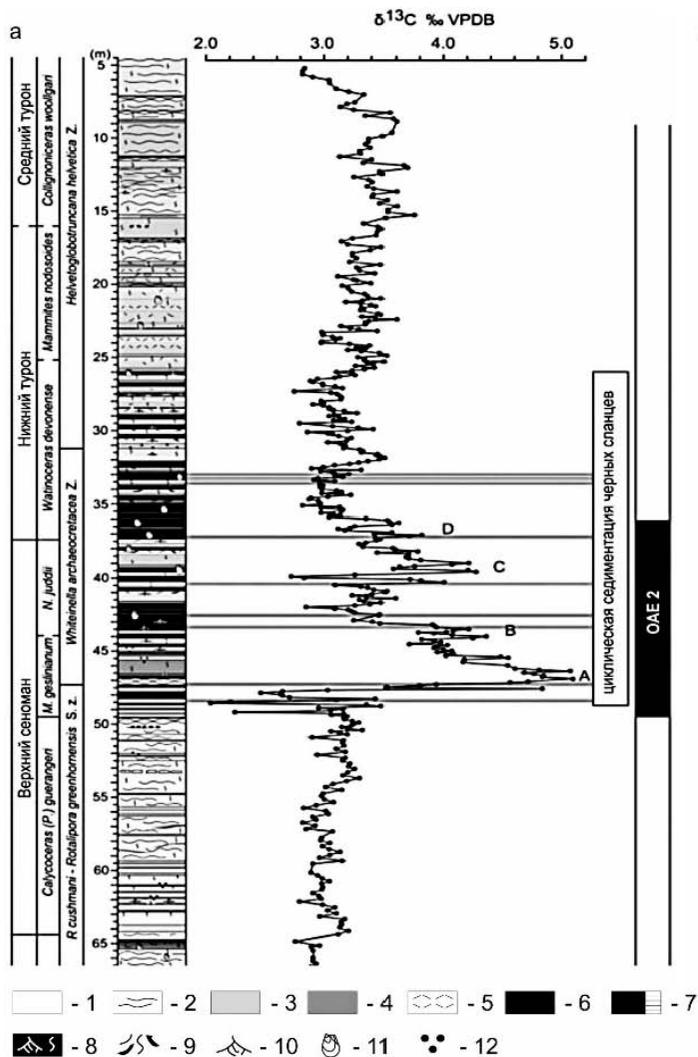


Рис. 4. Черные мергели (глины) позднесеноманского-раннетуронского возраста (OAE 2) в составе свиты Хессельталь (дер. Вунсторф, Нижнесаксонская впадина, Германия): а – строение разреза, по (Blumenberg, Wiese, 2012); б – строение элементарного циклита с участием черных мергелей (глин) в толще нижнетуронских отложений, по (Voigt et al., 2008). 1–8 – отложения: 1 – известняки, 2 – известняки с мутьообразной и линзовидно-волнистой слоистостью, 3 – мелоподобные известняки, 4 – мергели, 5 – сильно биотурбированные карбонатные осадки, 6 – черные мергели (глины), 7 – тонкослоистые черные глины, 8 – биотурбированные черные глины; 9 – биотурбация; 10 – хондриты; 11 – раковины иноцерамов; 12 – глауконит

в сопоставляемых разрезах: в Понт Д'Иссоль нижний и верхние горизонты находятся в разных биозонах, тогда как в Истборне большая часть черных мергелей сконцентрирована в биозоне *R. cushmani*. Очевидно, что их аккумуляция завершилась здесь до конца сеномана. В органической части черных известковых глин и/или мергелей преобладает аморфный материал сапропелевого типа (75-90%) с примесью гумусового вещества (5-10%) и плохо определяемых компонентов (5-15%). Среди распознаваемых остатков микрофлоры доминируют диноцисты.

В опорном разрезе Ливелло Бонарелли в Италии содержание C_{org} в черных глинах, отложенных на границе сеномана и турона, варьирует от 2,6 до 26,3%. Величина отношения C/N в этих осадках, как и других черных глинах из пелагических разрезов морских бассейнов

мелового периода, составляет $31,5 \pm 2,4$. Изучение образцов в поле электронного микроскопа показало, что в ОВ этих глин распространены три типа микрочастиц. Это компоненты, характеризующиеся уплощенной формой, диаметром 5-20 мкм и толщиной менее 1 мкм; растительный детрит, представленный, главным образом, спорами; а также округлые микрочастицы диаметром около 10 мкм, зачастую включающие кристаллы пирита (Ohkouchi et al., 2003).

На противоположной, южной окраине океана Тетис, в Марокко, концентрации C_{org} в черных глинах, отвечающих событию OAE 2, варьируют от 1 до 5% (в отдельных образцах более 8%) при значениях водородного индекса – от 220 до 700 мгУВ/г C_{org} . Эти отложения накапливались в теплом климате, характеризовавшемся чередованием засушливых и дождевых сезонов (Gertsch et al., 2010). В составе ОВ преобладает материал морского генезиса (тип керогена – I и IIS). Присутствие производных изоэриератана в черных глинах, вскрытых скважинами в глубоководной зоне СЗ окраины Африки, может свидетельствовать о периодическом сероводородном заражении не только глубинных, но и поверхностных вод в этом регионе. Одновозрастные отложения на окраине Туниса, Ливии и Египта в Средиземном море представлены тонким переслаиванием серых и темно-серых известняков с черными мергелями, отличающимися повышенным содержанием ОВ (Рис. 6). Вверх по разрезу у Джебел Гарси, где эти отложения выделяются в составе свиты Бахлул (мощность 10-40 м), чередование становится ритмичным, а прослои мергелей по толщине превосходят таковые известняков. Изучение микрофауны, представленной радиоляриями и планктонными фораминиферами, показало, что вмещающие породы были отложены в конце сеномана за несколько десятков тысяч лет до СТВ. Эти результаты свидетельствуют о некоторых различиях в возрасте черных мергелей OAE 2, накопившихся в эпиконтинентальных морях Европы и на окраине Африки (Moez et al., 2012).

В эпиконтинентальном бассейне Карак-Силла, расположенном в иорданском секторе карбонатной платформы Леванта, разрез верхнего мела (свита Наур) начинается водорослевыми известняками лагунного генезиса, которые перекрыты пачкой кальциферовых известняков, содержащих прослои черных мергелей. Концентрации C_{org} в них колеблются в диапазоне от 1 до 3%. Толща мощностью около 40 м характеризуется циклическим строением. Согласно аммонитам и планктонным фораминиферам, указанные отложения накапливались в обстановках открытого моря в конце сеномана и раннем туроне, т.е. отвечают OAE 2 (Wendler et al., 2014).

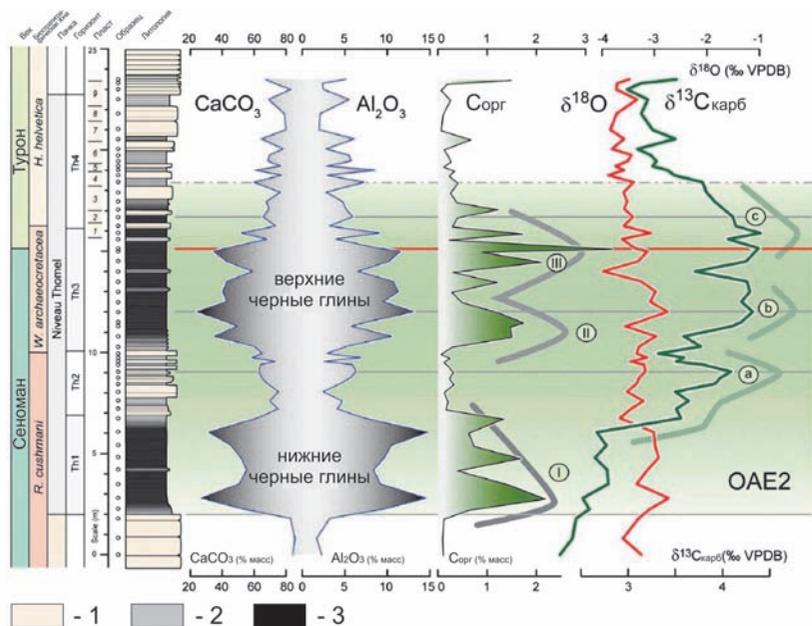


Рис. 5. Вариации значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C_{карб}$ на фоне изменения содержаний $CaCO_3$, Al_2O_3 и $C_{орг}$ в разрезе верхнесеноман-нижнетуронских отложений, Понт Д'Иссоль (Воконтэнский бассейн, Франция), по (Jarvis et al., 2011). Отложения 1-3: 1 – пелагические известняки, 2 – мергели, 3 – черные мергели и глины

Породы сеноман-туронского возраста с высокими концентрациями ОВ получили развитие и в пределах Северо-Восточного Перитетиса: Горном Крыму и Дагестане. Сапропелитовый горизонт, который выделяется в кровле сеноманской толщи в разрезах Горного Дагестана, имеет циклическое строение. Толщина отдельных циклитов изменяется от 3-4 до 10 см. Обогащенные ОВ прослои залегают в основании и кровле горизонта. В них фиксируются высокие значения водородного индекса: 248 и 346 мг УВ/г $C_{орг}$, отвечающие керогену I-II типов. В прослоях же с относительно низким содержанием ОВ эти значения снижаются до 130, что характерно для керогена III типа (Гаврилов и др., 2012).

Проведенные к настоящему времени исследования

свидетельствуют о том, что на протяжении ОАЕ 2 содержание CO_2 в атмосфере было очень высоким, почти в пять раз выше современного уровня. Резкое повышение его концентрации могло быть вызвано выделением огромных объемов газообразных флюидов при активизации магматизма в разных районах Мирового океана (Карибский бассейн, плато Кергелен и др.). Повышение температуры воды на поверхности океана (до 30-35°C) (Foster et al., 2007; Sinningh Damste et al., 2010) способствовало широкому распространению черных глин в морских осадках.

В Мексиканском заливе меловой период был временем формирования мощной карбонатной платформы, на северной окраине которой известняки включают горизонты и пачки эвапоритов. В разрезах шельфовых скважин породы с высоким содержанием ОВ, отвечающие ОАЕ, встречаются как в нижне-, так и в верхнемеловом комплексах отложений. Так, в пределах блока 253 и на поднятии Дестин в апт-альбской части разреза были встречены отложения, представленные глинами, известняками и алевролитами, которые характеризовались высоким уровнем гамма-излучения. В районе блока 264 (61,5 км к ЮВ от г. Нью-Орлеана) известняки темно-серого и черного цвета с повышенным фоном гамма-излучения присутствуют в сеноман-сантонском интервале разреза.

В альпийском заливе, а также в акватории микроплит, отделявших Тетис от расположенных южнее морских бассейнов Мезогеи, аккумуляция черных глин в интервале Бонарелли (ОАЕ 2) завершилась на границе сеномана и турона, тогда как в приконтинентальных областях (Вунсторф, Воконтэнский бассейн и др.) она продолжалась значительно дольше, вплоть до середины

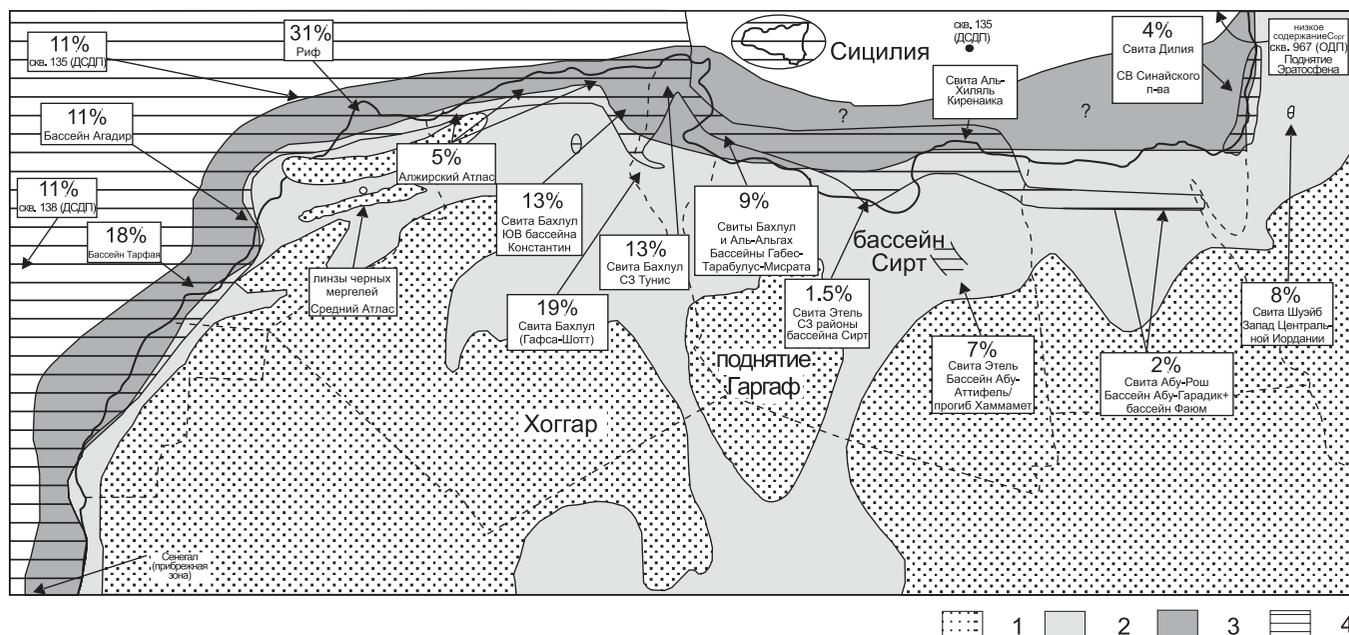


Рис. 6. Содержания $C_{орг}$ в породах позднесеноманского и раннетуронского возраста (ОАЕ 2) в бассейнах континентальной окраины Северной Африки, по (Luning et al, 2004). 1 – платформенные районы, 2 – области сноса обломочного материала, 3 – континентальный склон и глубоководные впадины, 4 – зоны аккумуляции отложений с высоким содержанием $C_{орг}$

раннего турона. Очевидно, что собственно аноксическое событие Бонарелли это лишь одна из фаз, хотя и самая существенная, формирования отложений, обогащенных ОВ. Ее длительность в одних регионах не превышала нескольких десятков тысяч лет, тогда как в других могла достигать 0,5 млн лет. Основные ареалы распространения черных глин находились в тропических и субтропических широтах, преимущественно в западном и центральном рукавах океана Тетис и заключенных между ними районах Атлантики, где продолжался активный спрединг океанского дна. В Тихом океане аккумуляция этих осадков носила спорадический характер. Она была приурочена к вершинам и подводным склонам подводных гор (глины смагинской свиты), атоллов (Резолушн) и крупных вулканических поднятий (плато Кергелен и Эксмут).

ОАЕ 3 (позднеконьяк-сантон-кампанское аноксическое событие). В конце коньякского века, в сантоне и кампане поступление водных масс из Тихого океана в южные районы Центральной Атлантики существенно возросло. На это указывает широкое распространение черных глин в обширной зоне атлантической окраины Южной Америки, включая СВ периферийные районы Венесуэлы, Тринидад и Тобаго, а также подводное плато Демерара, где при бурении по программе ОДП в точках 1257-1261 (рейс 207) был вскрыт горизонт тонкослоистых известковых глин, включающих фекальные пеллеты и кости рыб с содержанием $C_{орг}$ от 1 до 2,5% и серы от 4 до 12%. По возрасту эти отложения отвечают последнему из меловых океанских аноксических событий – ОАЕ 3. В отдельных прослоях керна из интервала 570,5-571 м было зафиксировано резкое увеличение концентрации фосфора, до 1-2,5%, который находился в форме гидроксиапатита в составе микростяжений округлой или эллиптической формы и диаметром до нескольких мм. Концентрация P_2O_5 в этих прослоях достигала 46 и даже 58 г/кг осадка. Вслед за активной аккумуляцией ОВ и последующим увеличением процессов сульфат-редукции, в донных осадках происходило осаждение сульфидов Cd, V и Zn (Marz et al., 2008). Черные глины известны и в американской части Галф Кост в составе формации Тускалуса, где они приурочены к терригенным отложениям коньяк-сантонского возраста.

Скважина 159-959 Д, пробуренная в центральной части Атлантического океана в зоне трансформных разломов вблизи континентального склона Кот Д'Ивуара (гл. 2090,7 м), вскрыла толщу глинистых осадков раннеконьякского – позднепалеоценового возраста, в нижней части которой находились черные глины. Это параллельно слоистые тонкодисперсные осадки темно-серого до черного цвета, содержащие фрамбозды пирита, а в верхней части интервала (1043,3-1024,0 м), в котором они обнаружены, также большое количество кристаллов доломита.

К интересным выводам пришел швейцарский исследователь Х.Вайссер. Согласно ему, кривая колебаний отношения стабильных изотопов С отражает многочисленные пертурбации в глобальном цикле углерода в меловое время. Положительные сдвиги на этой кривой являются ответом биосферы на резкие изменения, тогда как отрицательные аномалии обусловлены внезапным поступлением легкого CO_2 в биосферу. Эти колебания накладывались на долговременные изменения климата, имевшие место в меловой период (Weissert, 2013).

Отражение океанских аноксических событий в нефтематеринских формациях мелового возраста на окраинах континентов

Бассейн Персидского залива. После отделения Индостанского субконтинента от Аравии между ними образовался глубокий пролив с океанским типом коры (Betta, Angiolini, 2014), куда из Нео-Тетиса стали проникать морские течения. Сильные ветры из пустынных районов, занимавших большую часть Аравийского п-ва, сгоняли прогретую морскую воду, на место которой всплывала холодная глубинная вода, насыщенная биогенными веществами, что провоцировало сезонное цветение различных групп фитопланктона, главным образом, сине-зеленых водорослей. Их остатки вместе с раковинками радиолярий и планктонных фораминифер концентрировались в затишных участках обширного шельфа, получивших название внутришельфовых впадин и находившихся вне зоны воздействия штормовых волн. В условиях дефицита O_2 , который расходовался на окисление ОВ, здесь стали накапливаться осадки с высоким содержанием $C_{орг}$ и кремнезема: темноцветные глинисто-кремнисто-карбонатные, либо карбонатно-кремнистые илы.

В конце юрского периода черные мергели и глины накапливались во внутришельфовой впадине, располагавшейся в СВ районах Саудовской Аравии и на п-ве Катар. Они выделяются в составе свиты Ханифа и содержат от 1 до 6% $C_{орг}$ (Alsharhan, Nairn, 1997). С этого времени и вплоть до конца мелового периода процессы аккумуляции осадков, обогащенных ОВ, в бассейне Персидского залива фактически не прекращались. Менялись лишь ареалы их распространения. В раннемеловую эпоху они располагались преимущественно в иранском секторе региона, где активизировались процессы прогибания земной коры. Начиная с неокома, в северной части этого сектора накапливались черные кремнисто-карбонатные отложения свиты Гарау. Позднее их сменили глинистые известняки свиты Гадван, которые получили развитие южнее, в частности, в пределах блока Фарс.

Основным ареалом распространения свиты Гарау, с несогласием залегающей на верхнеюрских эвапоритах, является внутренний борт Месопотамского прогиба, где в раннемеловой время располагалась одноименная впадина. В низах разреза здесь залегают тонкослоистые аргиллиты с прослоями глинистых известняков и пропластками кремней. Выше они замещаются тонко слойчатыми глинистыми известняками с высоким содержанием ОВ, которые в кровле формации уступают место массивным серым известнякам, содержащим прослой глинистых известняков. Возраст пород в нижней половине разреза – неоком-аптский. По всему разрезу в породах рассеяно большое количество раковин радиолярий и кремнистые конкреции, размер которых варьирует от нескольких мм до десятков см. Встречаются и микростяжения фосфатных минералов, что свидетельствует о господстве на дне морского бассейна аноксических условий. Отдельные прослой кремнистых пород сложены спиккулами губок (Рис. 7), что обычно указывает на низкие температуры в придонном водном слое. Очевидно, что аккумуляция отложений Гарау происходила в глубоководных обстановках. В составе ОВ

доминируют аморфные компоненты (тип керогена – П) (Navidtalab et al., 2014). Лишь отчасти черные глинистые известняки Гарау могут коррелироваться с самым ранним, позднеготеривским, аноксическим событием мелового периода. При среднем содержании в породах Гарау $C_{орг}$ в количестве 2-2,5%, в них заключены значительные объемы сапропелевого ОВ. В иранском секторе бассейна мощность свиты достигает 703 м.

С альбской трансгрессией моря в бассейне Персидского залива связано формирование нефтематеринских отложений свиты Каждуми. Черные глины и мергели Каждуми с содержанием $C_{орг}$ в количестве от 3 до 6% и мощностью от 210 до 300 м рассматриваются в качестве самого богатого в регионе источника УВ (Bordenave, Burwood, 1994). Средние значения водородного индекса (HI) в них составляют 236 мгУВ/г $C_{орг}$ при максимальных – 490 мгУВ/г $C_{орг}$. В центральном секторе (зона Фарс), где в составе ОВ преобладают остатки наземной растительности, значения HI значительно снижаются (Rezaie Kavandudi et al., 2015). Отложения свиты прослеживаются через всю акваторию Персидского залива вплоть до побережья Омана, где их мощность сокращается до 130 м.

В зоне простой складчатости Загроса (залив Дезфуль) в составе свиты Каждуми находятся как карбонатные, так и терригенные отложения, которые накапливались в лагунных условиях и обстановках открытого моря. Терригенные фации представлены песчаниками и глинами. В районе скв. Сулабдар мощность песчаных пластов, образованных кварцевыми аренидами красновато-коричневого цвета, содержащими обломки кремней и железистых оолитов, не превышает 9 м. Карбонатный материал представлен члениками морских лилий.

Обогащенные ОВ темноцветные породы в разрезе Каждуми содержат остатки разнообразных планктонных организмов, споры, углефицированный растительный детрит и в редких случаях – кристаллы доломита. В темноцветных разностях рассеяны пирит и битуминозные компоненты. В береговой зоне и иранском секторе Персидского залива разрез Каждуми образован известняками с прослоями карбонатных глин и черных битуминозных мергелей (Рис. 8). Присутствие раковин аммонитов, планктонных фораминифер и фрагментов морских лилий свидетельствует о морских условиях, наиболее приближенных к обстановкам прибрежного и внешнего карбонатного рампа. В прибрежной части рампа накапливались биокластовые карбонатные осадки, в то время как обогащенные ОВ отложения накапливались в пелагических и гемипелагических условиях. В разрезах Каждуми присутствуют и фации лагунных осадков (Soleimani et al., 2014).

Черные карбонатные глины, мергели и известняки продолжали аккумулироваться в восточных районах

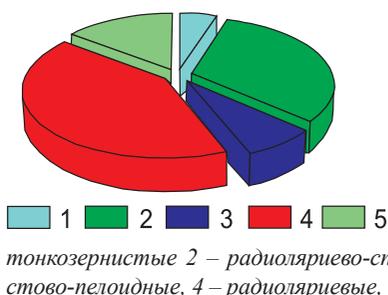


Рис. 7. Основные литофации, выделяемые в разрезах свиты Гарау, в иранском секторе бассейна Персидского залива, по (Navidtalab et al., 2014). 1 – черные глинистые тонкозернистые 2 – радиоляриево-стикулитовые, 3 – биокластово-пеллоидные, 4 – радиоляриевые, 5 – фораминиферовые

Персидского залива и в первой половине сеномана, где они представлены пачкой Ахмади мембер. Эта толща мощностью от 75 до 105 м сложена серыми и черными битуминозными глинами, переслаивающимися с мергелями и тонкослоистыми известняками. Если породы свит Каждуми и Ахмади могут сопоставляться с ОАЕ 1с-d и МСЕ, соответственно, то следующее, самое крупное

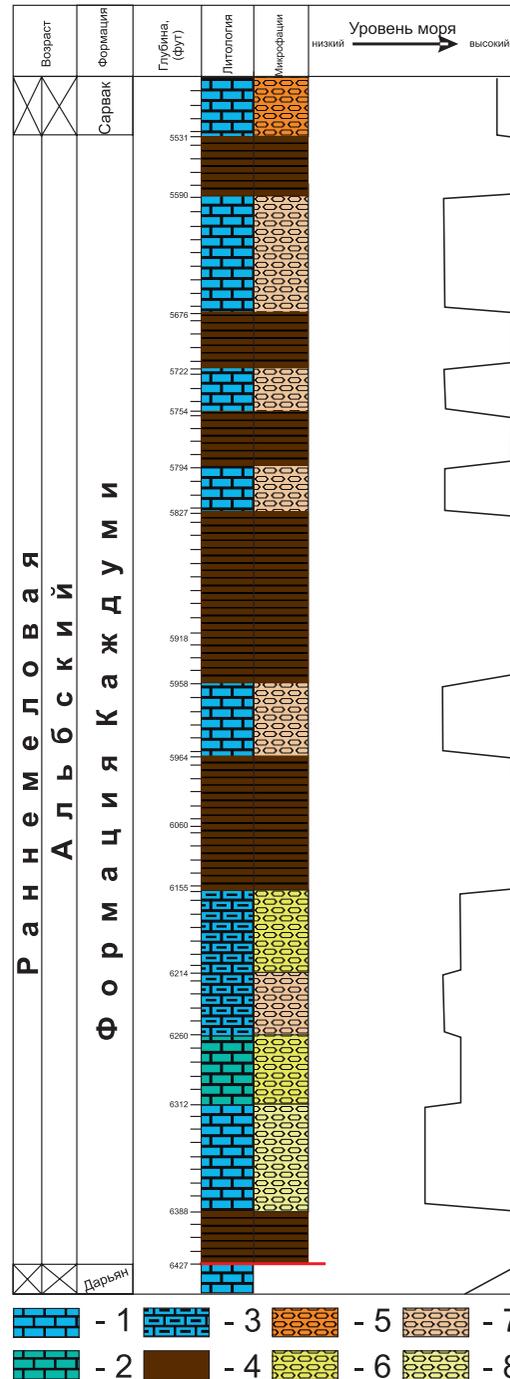


Рис. 8. Строение разреза формации Каждуми на месторождении Чилингар в иранском секторе бассейна Персидского залива, по (Soleimani et al., 2014). Породы: 1-5: 1 – карбонатные темно-коричневые глины с высоким содержанием ОВ (пелагические обстановки); 2 – биокластовый известняк (прибрежная часть карбонатного рампа), 3 – микритовый глобигериновый известняк (внешняя часть карбонатного рампа), 4 – микритовый известняк с преобладанием раковин олигостегинид и глобигерин (гемипелагические обстановки), 5 – биокластовый песчаный известняк с зернами кварца и глауконита (лагунные обстановки)

аноксическое событие Бонарелли (ОАЕ 2) не нашло отражения в разрезах меловых отложений в бассейне Персидского залива. Возможно, это связано с размывом, который синхронизируется со средним туроном и был вызван существенным падением уровня морских вод. Последнему меловому аноксическому событию ОАЕ 3 отвечают породы свиты Шираниш, выделяемые в разрезах платформенного борта Месопотамского прогиба в СВ районах Ирака.

На этом, однако, аккумуляция осадков с повышенным содержанием ОВ в регионе Персидского залива не закончилась. В конце мелового периода (кампан-ранний маастрихт) в иранском секторе бассейна сформировалась толща мергелей и глин с горизонтами планктоногенных известняков и кремнистых осадков мощностью от 350 до 500 м, известная как свита Гурпи. В этом интервале времени произошли события, предопределившие дальнейшее развитие региона, а именно закрытие центрального рукава океана Тетис, которое дало толчок формированию надвигово-складчатого пояса Загроса и Месопотамского передового прогиба перед ним. Углубление и расширение последнего сопровождалось аккумуляцией в палеоцене и первой половине эоцена еще одной толщи черных глин – свиты Пабдех.

Таким образом, накопление морских осадков со значительным содержанием ОВ, продолжавшееся с небольшими перерывами в бассейне Персидского залива на протяжении более 100 млн лет, не было связано с океанскими аноксическими событиями, хотя частично и совпадала с большинством из них. Очевидно, что решающими факторами, которые определили формирование нефтематеринских свит в этом богатейшем в мире по запасам УВ регионе, было сочетание благоприятных тектонических, климатических и океанографических условий, сложившихся в мезозое и начале кайнозоя на аравийской окраине африканского материка.

Маракайбский, Восточно-Венесуэльский и другие бассейны на окраине Южной Америки в Карибском море. Ведущую роль в генерации нефтяных УВ этого обширного региона сыграли отложения свиты Ла Луна. Черные мергели и известняки Ла Луна, накапливавшиеся в обстановках среднего и внешнего шельфа в самом конце альба и сеномане, содержат многочисленные раковины фораминифер и карбонатные конкреции. Они в высокой степени обогащены органическим материалом ($C_{орг}$ от 2 до 16%, в среднем 4,5%) и продуцировали большую часть УВ (до 98%), заключенных в залежах Маракайбского бассейна. В разрезе осадочного чехла этого бассейна мергели и известковые глины Ла Луна залегают на массивных известняках свиты Марака верхнего альба, которые включают горизонты черных глин (мощность 10-15 м). Соотношение пристана к фитану больше 1. Количество УВ (C_{15+}), извлекаемых из этих отложений, составляет около 2.500 частей на млн, что свидетельствует об их высоком нефтегенерационном потенциале. Значения НИ в породах Ла Луна, которые в настоящее время залегают на гл. 3-4 км и уже продуцировали огромное количество битумоидов, остаются высокими – от 156 до 220 мг УВ/г $C_{орг}$ (Castillo, Mann, 2006).

В основании предгорного бассейна Путумайо, который расположен на стыке Южно-Американского кратона и Колумбийских Анд, развиты верхнеюрские и меловые

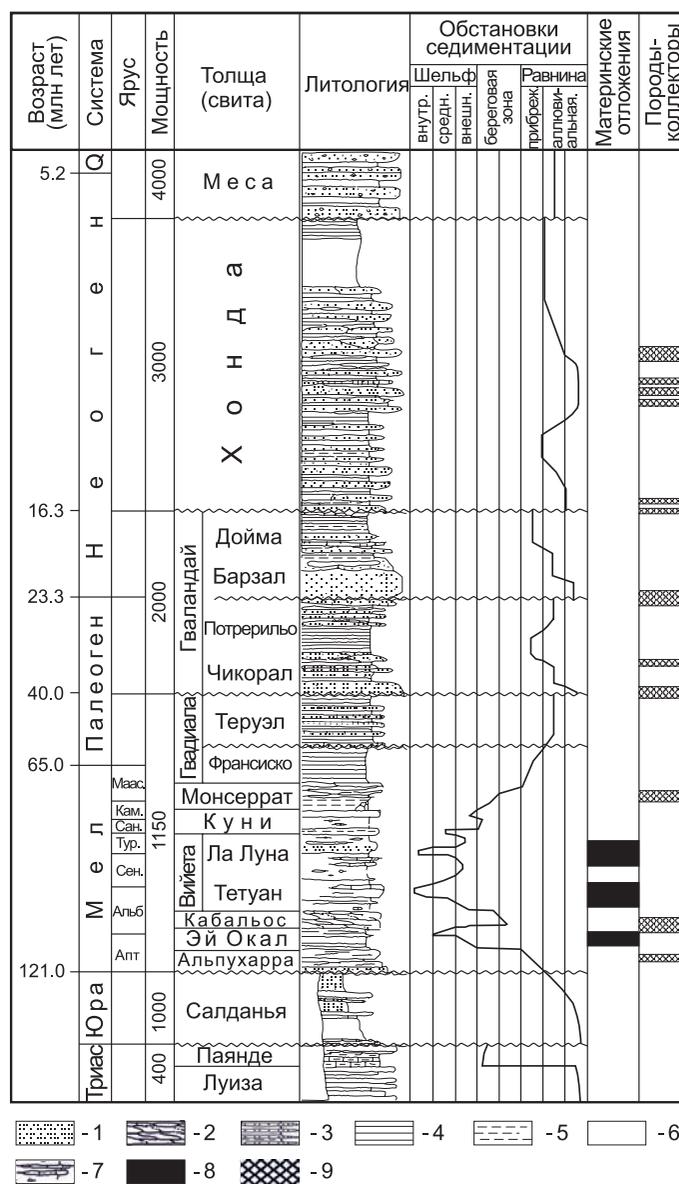


Рис. 9. Строение разреза, основные нефтематеринские свиты и природные резервуары в межгорной впадине Путумайо (Колумбия), по (Goncalvez et al., 2002). 1-3 – песчаники: 1 – дельтовые, 2 – прибрежно-морского и эстуарного генезиса, 3 – аллювиальные и пролювиальные, 4 – глины, 5 – карбонатные глины, 6 – известняки, 7 – глинистые известняки, 8 – известняки и мергели, обогащенные ОВ; 9 – нефтематеринские породы; 10 – породы-коллекторы

отложения. Основные запасы нефти, выявленные в регионе, заключены в песчаниках (свиты Кабальос, Нижняя Вийета и Пепино). По данным Ф. Гонкалвеса с соавторами (Goncalvez et al., 2002), ловушки заполнялись УВ, поступавшими из двух источников: альбских глин подстилающих печаники Кабальос, и карбонатных глин и мергелей Вийета (свиты Тетуан и Ла Луна), имеющих позднеальбский и сеноман-туронский возраст (Рис. 9). Хотя и те, и другие накапливались в морских обстановках, они сильно отличаются по составу керогена, в них заключенного. Наиболее высокими содержаниями $C_{орг}$ (нередко до 9% и выше) характеризуются карбонатные глины и мергели Вийета. При этом до 80% в структуре керогена приходится на аморфный материал, а значения водородного индекса фиксируются на уровне 200-500 мг УВ/г $C_{орг}$. Содержание $C_{орг}$ в альбских глинах не превышает 1-3% при колебаниях

значений $NI = 120-350$ мг УВ/г $C_{орг}$, что обусловлено неравномерным поступлением с суши растительной органики (от 25 до 85% ОВ). (Goncalvez et al., 2002).

Заключение

В эпоху глобального похолодания, наступившего в конце апта и начале альба и сопровождавшегося значительным падением уровня моря, ареалы аккумуляции осадков, обогащенных ОВ, сместились с шельфов в более глубоководные обстановки: на подводные плато Мазаган и Демерара в центральной части Атлантики и окраины террейнов в океане Тетис. В отличие от черных глин, отложенных в течение других ОАЕ, в составе этих образований значительную, а, возможно, и преобладающую роль играют остатки архей – древнейших примитивных микроорганизмов (Kuypers et al., 2001).

Позднее через открывшийся в результате альбской трансгрессии Центрально-Американский пролив возобновился водообмен между Атлантикой и Тихим океаном: более теплые и соленые воды из Атлантики устремились на запад, в то время как поток подповерхностных, более холодных вод из Тихого океана стал перемещаться в обратном направлении. В интервалы времени, когда в зонах перехода от континента к океану складывались условия, отвечающие климатическому оптимуму, фертильность морского фитопланктона резко возрастала, а обилие опускавшихся на дно органических остатков приводило вскоре к дефициту кислорода. Одной из причин возникновения аноксии в придонных водах могло быть усиление плотностной стратификации водной толщи, наблюдавшееся в летний и зимний сезоны. Напротив, при переходе от зимы к лету и обратно ветровая активность увеличивалась, что усиливало перемешивание вод и благоприятствовало вспышке биологической продукции. Она была особенно высокой там, где более холодные глубинные воды из Тихого океана всплывали над окраинами континентов, вызывая эффект апвеллинга.

К середине альбского века в тропических и субтропических широтах сложились два пояса аккумуляции черных глин и/или мергелей. Один протягивался из южных районов Северо-Американского континента (Мексика и Техас) через центральную часть Атлантики в альпийский залив океана Тетис. В конце сеномана он распространился на центральные и южные районы Европы и далее на восток вплоть до Крыма и Кавказа. Господствовавшие здесь вплоть до середины турона условия способствовали формированию климата, который был близок к современному муссонному. Карбонатные осадки отлагались в интервалы господства более аридных условий, которые благоприятствовали развитию карбонатного наннопланктона. В районах, находившихся под воздействием речного стока, среди основных продуцентов ОВ, помимо морских организмов, были и пресноводные водоросли. Там же, где речной сток не играл существенной роли, главными продуцентами ОВ являлись сине-зеленые водоросли. О значительной активности ветров свидетельствует большое количество спор и пыли в карбонатных прослоях из пачек черных мергелей.

Южный пояс распространения черных мергелей простирался от карибской окраины Южной Америки (Маракаибский, Восточно-Венесуэльский и другие бассейны) и подводного плато Демерара через Атлантику к

континентальной окраине Африки и далее в центральную часть океана Тетис. Если в альбское время большая часть этого пояса располагалась на границе тропической и аридной зон, то в конце сеномана она оказалась в области господства аридного климата. Сильные ветры, дувшие в западном и северо-западном направлении, отгоняли разогретую воду от побережья. Всплывавшие ей на смену глубинные воды, насыщенные растворенной кремниевой кислотой, обеспечивали увеличение биопродукции фитопланктона и распространение радиолярий. Следует особо отметить, что именно в этом поясе в альб-сеноманское время сформировались самые известные нефтематеринские свиты (Каждуми, Бахлул, Этель, Ла Луна и другие). Очевидно, что по широте распространения и количеству органического углерода, захороненного в морских и океанских осадках, позднесеноман-раннетуронское событие явилось наиболее ярким эпизодом формирования черных глин в меловой период.

Литература

- Гаврилов Ю.О., Щербинина Е.А., Голованова О.В. и др. Углеродистые отложения позднего сеномана Восточного Кавказа – региональное отложение глобального «аноксического» события ОАЕ 2. В сб. *статей «Геология и полезные ископаемые Кавказа». Труды Ин-та геологии ДНЦ РАН.* 2012. Вып. 58. С. 26-35.
- Alsharhan A.S., Nairn M.E. Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East. Amsterdam: Elsevier. 1997. 843 p.
- Ando A., Huber B., MacLeod K. et al. Black Nose stable isotopic evidence against the Mid-Cenomanian glaciation hypothesis. *Geology.* 2009. V. 37. Pp. 451-454.
- Bordenave M.L., Burwood R. The Albian Kazhdumi formation of the Dezful Embayment Iran: one of the most efficient petroleum-generating systems. Ed. Katz B. *Petroleum source rocks.* Heidelberg: Springer-Verlag. 1995. Pp. 183-207.
- Blumenberg M., Wiese F. Imbalanced nutrients as triggers for black shale formation in a shallow shelf setting during the OAE 2 (Wunstorf, Germany). *Biogeoscience.* 2012. V. 9. Pp. 4139-4153.
- Castillo M., Mann P. Deeply buried, early cretaceous paleokarst terrane, Southern Maracaibo basin, Venezuela. *Bull. AAPG.* 2006. V. 90. No. 4. Pp. 567-579.
- Dumitrescu M., Brassell S., Schouten S. et al. Instability in tropical Pacific sea-surface temperatures during the early Aptian. *Geology.* 2006. V. 34. Pp. 833-836.
- Goncalvez F., Mora C., Cordoba F. et al. Petroleum generation and migration in the Putumayo basin, Colombia: insights from an organic geochemistry and basin modeling study in the foothills. *Marine and petroleum geology.* 2002. V.19. Pp. 711-725.
- Gertsch B., Adatte Th., Keller G. et al. Middle and Late Cenomanian anoxic events in shallow and deep shelf environments of western Morocco. *Sedimentology.* 2010. V. 57. Pp. 1430-1462.
- Jahren A., Arens N., Sarmiento G. et al. Terrestrial record of methane hydrate dissolution in the Early Cretaceous. *Geol. Soc. Am. Bull.* 2001. V. 29. Pp. 159-162.
- Jarvis I., Lignum J., Grocke D. et al. Black shale deposition, atmospheric CO₂ drawdown and cooling during the Cenoman-Turonian oceanic anoxic event. *Paleoceanography.* 2011. V. 26. Pp. 1-17.
- Jenkyns H., Wilson P. Stratigraphy, paleoceanography and evolution of Cretaceous Pacific guyots: relics from a greenhouse Earth. *Amer. J. Science.* 1999. V. 299. Pp. 341-392.
- Kuypers M., Blokker P., Erbacher J. et al. Massive expansion of marine archaea during a Mid-Cretaceous oceanic anoxic event. *Science.* 2001. V. 293. Pp. 92-94.
- Leckie R.M., Bralower T., Cashman R. Oceanic anoxic events and plankton evolution: biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous. *Paleoceanography.* 2002. V. 17. 13 p.
- Lohr S., Kennedy M. Organomineral nanocomposite carbon burial during OAE 2. *Biogeoscience.* 2014. V. 11. Pp. 4971-4983.
- Luning S., Kolonic S., Belhadj Z. et al. Integrate depositional model for the Cenomanian-Turonian oceanic-rich strata in North Africa. *Earth-Sci.* 2004. V. 64. Pp. 51-117.
- Marz C., Poulton S., Beckmann B. et al. Redox sensitivity of P cycling

during marine black shale formation: Dynamics of sulfidic and anoxic, non-sulfidic bottom waters. *Geochimica and Cosmochimica Acta*. 2008. V. 72. Pp. 2703-3717.

Mehay S., Keller Cr., Bernasconi St. et al. A volcanic CO₂ pulse triggered the Cretaceous Oceanic anoxic event 1a and a biocalcification crises. *Geological society of America*. 2009. V. 37. N 9. Pp. 819-822.

Moez B., Mohamed S., Taher Z. Radiolarian age constrained of Mid-Cretaceous black shales in North Tunisia. *Earth Science*. Ed. Dar I.A. 2012. Pp. 648.

Naafs B., Castro J., De Gea G. et al. Gradual and sustained carbon dioxide release during Aptian Oceanic Anoxic Event 1a. *Nature geosciences*. 2016. 8 p.

Navidtalab A., Rahimpour-Bonab H., Nazari-Badii A. et al. Challenges in deep basin sequence stratigraphy: a case study from Early-Middle Cretaceous of SW Zagros. *Facies*. 2014. V. 60. Pp. 195-215.

Norris R., Bice K., Mango E. et al. Jiggling the tropical thermostat in the Cretaceous hothouse. *Geology*. 2002. V. 30. Pp. 299-302.

Ohkouchi N., Kuroda J., Okada M. et al. Why Cretaceous black shales have high C/N ratios: implications from SEM-EDX observations for Livello-Bonarelli black shales at the Cenomanian-Turonian boundary. *Frontier research on Earth evolution*. 2003. V. 1. Pp. 239-241.

Pacton M., Schmid T., Gorin G. et al. Cretaceous black shale: a window into microbial life adaptation. *Terra Nova*. 2011. Pp. 1-7.

Rezaie Kavandudi Z., Rabbani A., Mashhadi Z. Source rock evaluation of the Cretaceous Kazhdumi formation in the Persian Gulf. *Energy Sources*. 2015. V. 37. Pp. 2293-2301.

Sefidari E., Amini A., Dashti A. Source rock characteristics of Albian Kaxhdumi formation in Zagros region. *Arabian Geol. Geoscience*. 2015. V. 8. Pp. 8327-8345.

Sinninghe-Damste J., Kuyouers M., Schouten S. et al. The lycopene/C31 n-alkane ratio as a proxy to assess palaeo-oxygenicity during sediment deposition. *Earth Planet. Sci. Lett*. 2003. V. 203. Pp. 215-226.

Soleimani B., Monjezi K., Malaki S. Microfacies, diagenesis and depositional environments of Kazhdumi formation, Dezful embayment, Zagros, NW Iran. *Jour. Geol. Geoscience*. 2014. V. 3. 12 p.

Strasser A., Caron M., Gjermani M. The Aptian, Albian and Cenomanian of Rotter Sattel, Forlandes Prealps, Switzerland: a high-resolution record of oceanographic changes. *Cretaceous research*. 2001. V. 22. Pp. 173-199.

Tiraboschi D., Erba E., Jenkyns H. Origin of rhythmic Albian black shales (Piobbico core, central Italy): Cretaceous nannofossil quantitative and statistical analysis and paleoceanographic reconstructions. *Paleoceanography*. 2009. V. 6. doi:10.1029/2008PA001670

Wang Ch., Hu X., Huang Y. et al. Cretaceous oceanic red beds as possible consequence of oceanic anoxic events. *Sedimentary geology*. 2011. V. 235. Pp. 27-37.

Weissert H. Cretaceous towards a history of the global carbon cycle. *The International Symposium on the Cretaceous system: Abstracts*. Ankara. Turkey. 2013. Pp. 26.

Wendler J., Meyers St., Wendler I. et al. A million-year-scale astronomical control on Late Cretaceous sea-level. *Newsletters on Stratigraphy*. 2014. 19 p.

Voigt S., Erbacher J., Mutterlose J. et al. The Cenomanian – Turonian of the Wunstorf section (North Germany): global stratigraphic reference section and new orbital time scale for Oceanic Anoxic Event 2. *Newsletters on Stratigraphy*. 2008. V. 43. N 2. Pp. 66-89.

Сведения об авторе

Александр Иванович Коныхов – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, 1
e-mail: konyuhov@geol.msu.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2017;

Принята к публикации 05.04.2017;

Опубликована 20.05.2017

Oceanic anoxic events of the Cretaceous period and their role in the formation of source rocks in the basins of continental margins

A.I. Konyukhov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. The Cretaceous period was marked not only by the dominance of warm climate, vast transgressions of the sea and widespread occurrence of carbonate deposits, but also by the formation of the richest petroleum formations, which are associated with the generation of a huge amount of hydrocarbons in the largest oil and gas basins of modern continental margins. Both early and late Cretaceous epochs were marked by several oceanic anoxic events (OAE) of global and regional scale, accompanied by the accumulation of sediments enriched in organic matter, and by significant shifts in the ratios of stable isotopes C, O, and Sr. Various aspects of these events are considered in a huge number of articles published in recent years in major scientific publications. Unfortunately, their role in the formation of oil reservoirs has remained outside the scope of scientific analysis. Meanwhile Cretaceous OAE's had led to the spreading of black shale and other sediments with high content of organic matter on the floor of Tethys ocean, central part of Atlantic and on the seamounts in the Pacific ocean. Among them only OAE 1a (Selli) and OAE 2 (Bonarelli) are known as more large anoxic events. The first occurred in the middle of Aptian time, the second near the Cenomanian-Turonian boundary (CTB). The analysis of the spreading of source rocks in the largest oil-and-gas bearing basins on the continental margins at that time – the

Persian Gulf, Maracaibo, Middle and Upper Magdalena river, Putumayo and other basins – showed that episodes of OAE's had not always found a reflection in the succession of major source rock's formations. In the Persian Gulf a list of source rocks includes Hanifa, Garau, Gadvan, Kazhdumi, Ahmadi member and Gurpi formations of Cretaceous age. Thus it is certain that OAE's were only separate parts of more complex history of accumulation of black shale and carbonate deposits with high content of total organic carbon on the continental margins of the Cretaceous time.

Keywords: oceanic anoxic events, source rocks, the Cretaceous period, basins of continental margins, black shales

For citation: Konyukhov A.I. Oceanic anoxic events of the Cretaceous period and their role in the formation of source rocks in the basins of continental margins. *Georesursy = Georesources*. 2017. Special issue. Part 1. Pp. 43-55. DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.6>

References

Alsharhan A.S., Nairn M.E. Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East. Amsterdam: Elsevier. 1997. 843 p.

Ando A., Huber B., MacLeod K. et al. Black Nose stable isotopic evidence against the Mid-Cenomanian glaciation hypothesis. *Geology*. 2009. V. 37. Pp. 451-454.

- Bordenave M.L., Burwood R. The Albian Kazhdumi formation of the Dezful Embayment Iran: one of the most efficient petroleum-generating systems. Ed. Katz B. *Petroleum source rocks*. Heidelberg: Springer-Verlag. 1995. Pp. 183-207.
- Blumenberg M., Wiese F. Imbalanced nutrients as triggers for black shale formation in a shallow shelf setting during the OAE 2 (Wunstorf, Germany). *Biogeoscience*. 2012. V. 9. Pp. 4139-4153.
- Castillo M., Mann P. Deeply buried, early cretaceous paleokarst terrane, Southern Maracaibo basin, Venezuela. *Bull. AAPG*. 2006. V. 90. No. 4. Pp. 567-579.
- Dumitrescu M., Brassell S., Schouten S. et al. Instability in tropical Pacific sea-surface temperatures during the early Aptian. *Geology*. 2006. V. 34. Pp. 833-836.
- Gavrilov Yu.O., Shcherbinina E.A., Golovanova O.V. et al. Carboniferous deposits of the late Cenomanian of the Eastern Caucasus – a regional mapping of the global «anoxic» event of the OAU 2. V sb. statei «*Geologiya i poleznye iskopaemye Kavkaza*»: *Trudy In-ta geologii DNTs RAN* [Geology and Mineral resources of the Caucasus: Collected papers. Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2012. Is. 58. Pp. 26-35. (In Russ.)
- Goncalvez F., Mora C., Cordoba F. et al. Petroleum generation and migration in the Putumayo basin, Colombia: insights from an organic geochemistry and basin modeling study in the foothills. *Marine and petroleum geology*. 2002. V.19. Pp. 711-725.
- Gertsch B., Adatte Th., Keller G. et al. Middle and Late Cenomanian anoxic events in shallow and deep shelf environments of western Morocco. *Sedimentology*. 2010. V. 57. Pp. 1430-1462.
- Jahren A., Arens N., Sarmiento G. et al. Terrestrial record of methane hydrate dissolution in the Early Cretaceous. *Geol. Soc. Am. Bull.* 2001. V. 29. Pp. 159-162.
- Jarvis I., Lignum J., Grocke D. et al. Black shale deposition, atmospheric CO₂ drawdown and cooling during the Cenoman-Turonian oceanic anoxic event. *Paleoceanography*. 2011. V. 26. Pp. 1-17.
- Jenkyns H., Wilson P. Stratigraphy, paleoceanography and evolution of Cretaceous Pacific guyots: relics from a greenhouse Earth. *Amer. J. Science*. 1999. V. 299. Pp. 341-392.
- Kuypers M., Blokker P., Erbacher J. et al. Massive expansion of marine archaea during a Mid-Cretaceous oceanic anoxic event. *Science*. 2001. V. 293. Pp. 92-94.
- Leckie R.M., Bralower T., Cashman R. Oceanic anoxic events and plankton evolution: biotic response to tectonic forcing during the mid-Cretaceous. *Paleoceanography*. 2002. V. 17. 13 p.
- Lohr S., Kennedy M. Organomineral nanocomposite carbon burial during OAE 2. *Biogeoscience*. 2014. V. 11. Pp. 4971-4983.
- Luning S, Kolonic S., Belhadj Z. et al. Integrate depositional model for the Cenomanian-Turonian oceanic-rich strata in North Africa. *Earth-Sci*. 2004. V. 64. Pp. 51-117.
- Marz C., Poulton S., Beckmann B. et al. Redox sensitivity of P cycling during marine black shale formation: Dynamics of sulfidic and anoxic, non-sulfidic bottom waters. *Geochimica and Cosmochimica Acta*. 2008. V. 72. Pp. 2703-3717.
- Mehay S., Keller Cr., Bernasconi St. et al. A volcanic CO₂ pulse triggered the Cretaceous Oceanic anoxic event 1a and a biocalcification crises. *Geological society of America*. 2009. V. 37. N 9. Pp. 819-822.
- Moez B., Mohamed S., Taher Z. Radiolarian age constrained of Mid-Cretaceous black shales in North Tunisia. *Earth Science*. Ed. Dar I.A. 2012. Pp. 648.
- Naafs B., Castro J., De Gea G. et al. Gradual and sustained carbon dioxide release during Aptian Oceanic Anoxic Event 1a. *Nature geosciences*. 2016. 8 p.
- Navidtalab A., Rahimpour-Bonab H., Nazari-Badri A. et al. Challenges in deep basin sequence stratigraphy: a case study from Early-Middle Cretaceous of SW Zagros. *Facies*. 2014. V. 60. Pp. 195-215.
- Norris R., Bice K., Mango E. et al. Jiggling the tropical thermostat in the Cretaceous hothouse. *Geology*. 2002. V. 30. Pp. 299-302.
- Ohkouchi N., Kuroda J., Okada M. et al. Why Cretaceous black shales have high C/N ratios: implications from SEM-EDX observations for Livello-Bonarelli black shales at the Cenomanian-Turonian boundary. *Frontier research on Earth evolution*. 2003. V. 1. Pp. 239-241.
- Pacton M., Schmid T., Gorin G. et al. Cretaceous black shale: a window into microbial life adaptation. *Terra Nova*. 2011. Pp. 1-7.
- Rezaie Kavandudi Z., Rabbani A., Mashhadi Z. Source rock evaluation of the Cretaceous Kazhdumi formation in the Persian Gulf. *Energy Sources*. 2015. V. 37. Pp. 2293-2301.
- Sefidari E., Amini A., Dashti A. Source rock characteristics of Albian Kaxhdumi formation in Zagros region. *Arabian Geol. Geoscience*. 2015. V. 8. Pp. 8327-8345.
- Sinninghe-Damste J., Kuyuers M., Schouten S. et al. The lycopene/C31 n-alkane ratio as a proxy to assess palaeoacidity during sediment deposition. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 203. Pp. 215-226.
- Soleimani B., Monjezi K., Malaki S. Microfacies, diagenesis and depositional environments of Kazhdumi formation, Dezful embayment, Zagros, NW Iran. *Jour. Geol. Geoscience*. 2014. V. 3. 12 p.
- Strasser A., Caron M., Gjermeni M. The Aptian, Albian and Cenomanian of Rotter Sattel, Forlandes Prealps, Switzerland: a high-resolution record of oceanographic changes. *Cretaceous research*. 2001. V. 22. Pp. 173-199.
- Tiraboschi D., Erba E., Jenkyns H. Origin of rhythmic Albian black shales (Piobbico core, central Italy): Cretaceous nannofossil quantitative and statistical analysis and paleoceanographic reconstructions. *Paleoceanography*. 2009. V. 6. doi:10.1029/2008PA001670
- Wang Ch., Hu X., Huang Y. et al. Cretaceous oceanic red beds as possible consequence of oceanic anoxic events. *Sedimentary geology*. 2011. V. 235. Pp. 27-37.
- Weissert H. Cretaceous towards a history of the global carbon cycle. *The International Symposium on the Cretaceous system: Abstracts*. Ankara. Turkey. 2013. Pp. 26.
- Wendler J., Meyers St., Wendler I. et al. A million-year-scale astronomical control on Late Cretaceous sea-level. *Newsletters on Stratigraphy*. 2014. 19 p.
- Voigt S., Erbacher J., Mutterlose J. et al. The Cenomanian – Turonian of the Wunstorf section (North Germany): global stratigraphic reference section and new orbital time scale for Oceanic Anoxic Event 2. *Newsletters on Stratigraphy*. 2008. V. 43. N 2. Pp. 66-89.

About the Author

Aleksandr I. Konyukhov – DSc in Geology and Mineralogy, Professor, Petroleum Geology Department
Lomonosov Moscow State University
Russia, 119234, Moscow, Leninskie gory, 1
e-mail: konyuhov@geol.msu.ru

*Manuscript received 20 February 2017;
Accepted 5 April 2017; Published 20 May 2017*