

В октябре 2005 г. выходит две статьи, посвященные Алжирской нефтегазоносной провинции, написанные по материалам полевых экскурсий участников конференции EAGE, проведенной в Алжире в апреле 2005 г.

Литологический состав и история геологического развития осадочных пород раннего палеозоя по обнажениям в районе Тассили, Алжир The Lower Paleozoic succession in the Tassili outcrops, Algeria: sedimentology and sequence stratigraphy

Реми Эшар (Remi Eschard)¹, Хусейн Абдала (Hussein Abdallah)², Ф. Брейк (F. Braik)² и Ги Десоблью (Guy Desaubliaux)¹

Раннепалеозойские отложения описаны в ходе полевой экспедиции в район Тассили-д'Аджер (Tassili N'Ajjer) на юго-востоке Алжира, проведенной в рамках конференции EAGE в апреле 2005 г. Породы, представленные в обнажениях, идентичны коллекторам, из которых ведется добыча, и материнским породам, откуда поступают углеводороды, в примыкающих бассейнах Иллизи (Illizi) и Беркине (Berkine). В настоящей работе представлен опорный разрез нижнего палеозоя, обобщающий литологические и стратиграфические данные по обнажениям и исследованиям глубинного строения, а также его новая седиментологическая интерпретация. Приводится также новая версия истории геологического развития, которая позволит прогнозировать размеры и форму различных коллекторов разреза. В

раннепалеозойское время формирование осадочных отложений на Североафриканской платформе происходило в условиях медленного опускания и при низких темпах осадконакопления. Кратон Гондвана был разделен поднятиями на ряд бассейнов. Время от времени кратон деформировался, что приводило к образованию крупных флексур и незначительных угловых несогласий, отмечающих границы основных циклов осадконакопления. В зависимости от положения уровня моря отмечается чередование речных осадков и мелководных морских фаций. Оледенение в позднеордовикское время привело к появлению сети долин, выполненных ледниками и морскими осадками сложного строения.

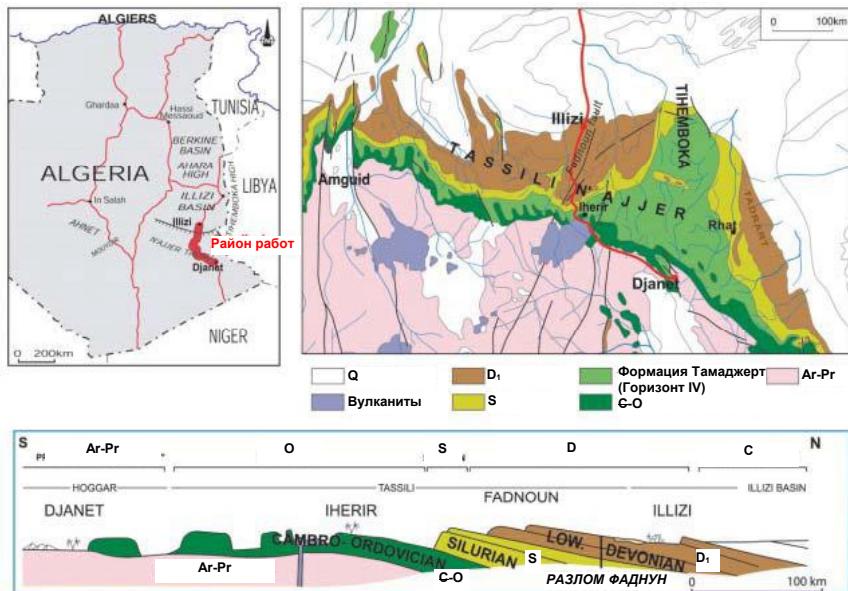


Рис. 1. Положение района работ, геологическая карта-схема Тассили Д'Аджер с указанием мест работ вдоль дороги Джанет – Иллизи и схематический геологический разрез отложений нижнего палеозоя Тассили. Переводы географических названий см. в тексте

Введение

В апреле 2005 г. по завершении конференции EAGE в Алжире 23 ее участники совершили полевую экспедицию на обнажения в Тассили-д'Аджер на юге Алжира. В этих замечательных местах, где в условиях пустыни сохраняется непрерывный разрез, на поверхность выходят породы возрастом от докембрийского до среднего девона. Маршрут начался в г. Джанет (Djanet) на докембрийских гранитах и сланцах и завершился через пять дней в Иллизи (Illizi) на эмсийских песчаниках нижнего девона (рис. 1). В ходе маршрута на этих выходах описаны литология осадочных пород, разрывные нарушения и история геологического развития

Обнажения этого района особенно интересны для геологов-нефтяников, поскольку эти породы являются нефтематеринскими в близлежащих нефтегазовых бассейнах Иллизи и Беркине и в области Хасси-Мессуд (Hassi-Messaoud) (рис. 1). Аналоги кембрийских, ордовикских и девонских песчаников, выходящих на поверхность в Тассили, являются там коллекторами. Силурийские сланцы также, возможно, являются в этих бассейнах нефтематеринскими.

¹Institut Francais du Pétrole

²Sonatrach, Division Exploration

Отложения, выходящие здесь на поверхность можно непосредственно сопоставить с отложениями в разрезе бассейнов Иллизи и Беркине.

Осадочные отложения региона впервые описаны Киллианом (Killian, 1922). Позднее Дюбуа (Dubois et al., 1967) описал стратиграфию и историю развития силурийских и девонских пород. Опорный разрез обнажений нижнего палеозоя в Алжире опубликован Бефом (Beuf et al., 1971). Эти авторы ввели номенклатуру отложений нижнего палеозоя и описали осадочные формации. Ими также выделены основные несогласия в разрезе нижнего палеозоя и дана их современная интерпретация, рассмотрено соотношение влияния тектонических процессов и климата на процесс осадконакопления. По заданию Министерства промышленности Алжира компании Sonatrach и Бейсип (Beïsip) провели детальную геологическую съемку района. Результаты этих работ, однако, публиковались редко, хотя в соседних бассейнах Иллизи и Беркине весьма активно велись разведка и добыча углеводородов. Целью настоящей работы является описание опорного разреза нижнего палеозоя в западной части Тассили и уточнение его истории геологического развития. Предлагается также вариант истории осадконакопления. Далее дается обобщение литологии и стратиграфии, и проводится сопоставление с данными о глубинном строении разреза.

Общее описание обнажений

Разрез палеозоя хорошо представлен (рис. 1) в полого падающей на север моноклинали Тассили-н'Ажжер на юго-востоке Алжира (Тассили – туарегское название обширного плато, на котором обитает племя ажжер). Внутреннее Тассили сложено песчаниками кембрия и ордовика, нависающими в виде обрыва широтного профиля над более мягкими докембрийскими породами. Депрессия Промежуточного Тассили представляет собой вытянутое в широтном направлении понижение с крутыми бортами (трог) в кровле сланцев, представляющих самые верхи ордовика и нижний силур.

Внешнее Тассили сложено песчаниками верхнего силура и нижнего девона, формирующими еще одно обширное плато в области Фаднун (Fadnoun). Севернее г. Иллизи на широких равнинах на поверхность выходят породы средне- и позднедевонского и карбонового возраста.

Тассили-н'Ажжер граничит с запада с поднятием Амгид Эль-Биод (Amguid El-Biod) по разломам меридионального профиля, наследующим панафриканским линеаментам. Они активировались в позднем мелу и позднее, в эоценовую эпоху (Boudjema, 1987). К востоку, ближе к границе Ливии, Тассили становится менее проявленным в рельефе. Крупная меридиональная флексура (рис. 1), поднятие Тихембока (Tihemboka), была активной при накоплении осадков в кембрии-ордовике, девоне и раннем карбоне, что в ходе осадконакопления привело к выклиниванию осадков и образованию эрозионных врезов (Beuf et al., 1971). Разрез нарушен также крупными разломами, такими как разлом Фаднун (рис. 1). Разломы наследуют панафриканским линеаментам и не раз активировались, особенно в позднем мелу и в эоцене (Boudjema, 1987). Наконец, в позднетретичное и четвертичное время вся область приподнялась и надвинулась на север к тепловой аномалии Хоггар (Hoggar).

медленно погружается, изредка развиваются крупные флексуры, что связано с активизацией линеаментов земной коры. В такие эпохи формировались слабые угловые несогласия и связанные с ними тектонические и стратиграфические клиноформы, особенно в ордовике (Таконское несогласие) и на границе силура и девона (Каледонское несогласие).

Осадконакопление проходило в обширных впадинах и бассейнах меньшего размера, расположенных на стабильном платформенном основании и разделенных тектоническими поднятиями, которые время от времени приподнимались и подвергались размыту. Поднятия соответствовали флексурам большой амплитуды, которые ограничивали более опущенные бассейны. Поднятия затапливались в эпохи высокого стояния моря, а при низком уровне моря выходили на поверхность и подвергались размыту, образуя локальные области сноса для близлежащих бассейнов. Одним из таких поднятий была область Тихембока на алжиро-ливийской границе. Бассейны Иллизи и Беркине также были разделены «Ахарским выступом» ('mole d'Ahara'), который на протяжении большей части палеозоя являлся положительной формой рельефа (рис. 1).

Геодинамика, палеогеография и климат позднего палеозоя

В позднем палеозое Сахарская платформа являлась северо-западной пассивной окраиной суперконтинента Гондвана. В целом с кембрийского по каменноугольное время участки к северо-западу от Сахарской платформы преобладали океанические условия. (Scotese et al., 1979). Снос обломочного материала с Гондванского щита шел на север и северо-запад по системам водных потоков (Beuf et al., 1971). В регressive эпохи и эпохи низкого стояния уровня моря осадочный чехол формировался в континентальных условиях, а в трангрессионные эпохи и эпохи высокого стояния уровня моря – в обстановке мелководных эпиконтинентальных морей, покрывавших в такие эпохи Сахарскую платформу.

Тектоническое и геологическое развитие Сахарской платформы в палеозойское время типично для платформ (Bennacef et al., 1971; Boote et al., 1998): стабильная платформа

изменения климата в регионе также оказывали значительное влияние на ход осадконакопления. В раннем палеозое регион находился в южных околоводородных широтах (Scotese et al., 1988; Schandelmeier et al., 1997), а в кембрии и ордовике – у самого Южного полюса. В целом климат был прохладным или холодным. В позднем ордовике произошло короткое, но надежно зафиксированное оледенение. Район работ находился под ледниковым щитом, что обусловило процессы ледниковой эрозии. Потепление в раннем силуре привело к крупной трангрессии. Силурийские «горячие сланцы» ('hot shales'), ставшие нефтетерринской породой, формировались в бескислородных условиях (Luning et al., 2000). Далее, в силуре-девоне, Гондванская плита быстро перемещалась к северу, и со временем климат стал более теплым.

Стратиграфия отложений кембрия-ордовика

Далее приводится краткое описание стратиграфических подразделений разреза, проиллюстрированное фотографиями обнажений, и история их развития. Опорный разрез нижнего палеозоя, представленный на рис. 2, прослежен вдоль дороги Джанет – Иллизи. Стратиграфия обнажений определена в (Dubois et al., 1967), и уточняется в (Beuf et al., 1971). В разрезах номенклатура отложений установлена в (Claraq et al., 1963) и (Jardine and Yapaudjian, 1967).

Соответствие пород обнажений и разреза бассейнов Иллизи и Беркене также представлено на рис. 2. Эта местная стратиграфическая шкала все еще используется. Сохраняются французские названия подразделений (даны и русские переводы – прим. перев.). Датировка пород в обнажениях затруднена, поскольку условия на поверхности не способствуют сохранению микрофауны и споро-пыльцевых остатков. Состав макрофлоры также сравнительно беден. В такой ситуации датировка основана на скважинных данных по прилегающим бассейнам.

Предкембрийское несогласие представляет собой обширную эродированную поверхность, секущую предкембрийские и докембрийские породы. Поверхность несогласия сформировалась в ходе размыва панафриканского рельефа. Поверхность прослеживается по всей Гондване. В обнажениях эрозионный контакт виден как резкая и совершенно плоская поверхность, секущая докембрийские граниты и осадки (рис. 3). В карманах поверхности несогласия сохранились скопления гальки и гравия со следами ветровой эрозии. Благодаря различному выветриванию различных пород докембия сохранился также сложенный палеорельеф (Beuf et al., 1971). Из наблюдений следует, что несогласие соответствует границе между водными и континентальными осадками, которую пересекал сносимый с платформы материал. Эта поверхность, по-видимому, отмечает также длительный перерыв в осадконакоплении. Выше несогласия в разрезе лежит нерасчлененная толща кембрий-ордовикских водных осадков. Песчаники Тин Тахарджели (Tin Taharadjeli), называемые иначе «Алжирской формацией ('Formation des Ajgers')», достигают севернее

Джанета мощности в 300 м и формируют окончание Внутреннего Тассили. Местами песчаники залегают на конгломератах Эль-Мунгарской формации (El- Moungar Formation, Beuf et al. 1971), но обычно они лежат непосредственно на предкембрийской поверхности несогласия. Низы песчаников Тин Тахарджели представлены грубо- и очень грубозернистыми разностями, с выдержаными по направлению царапинами и таблитчатой отдельностью поперек напластования,

что говорит о наличии потока текучих вод в северном и северо-западном направлении. Пойменные осадки не сохранились. Песчаники откладывались на широких равнинах, покрывавших в то время большую часть Сахарского щита. В средней части и в верхах песчаников Тин Тахарджели отмечается нарастание признаков влияния морской обстановки (рис. 4). Грубозернистые песчаники с разнонаправленной сигмаобразной отдельностью откладывались в протоках дельт и в

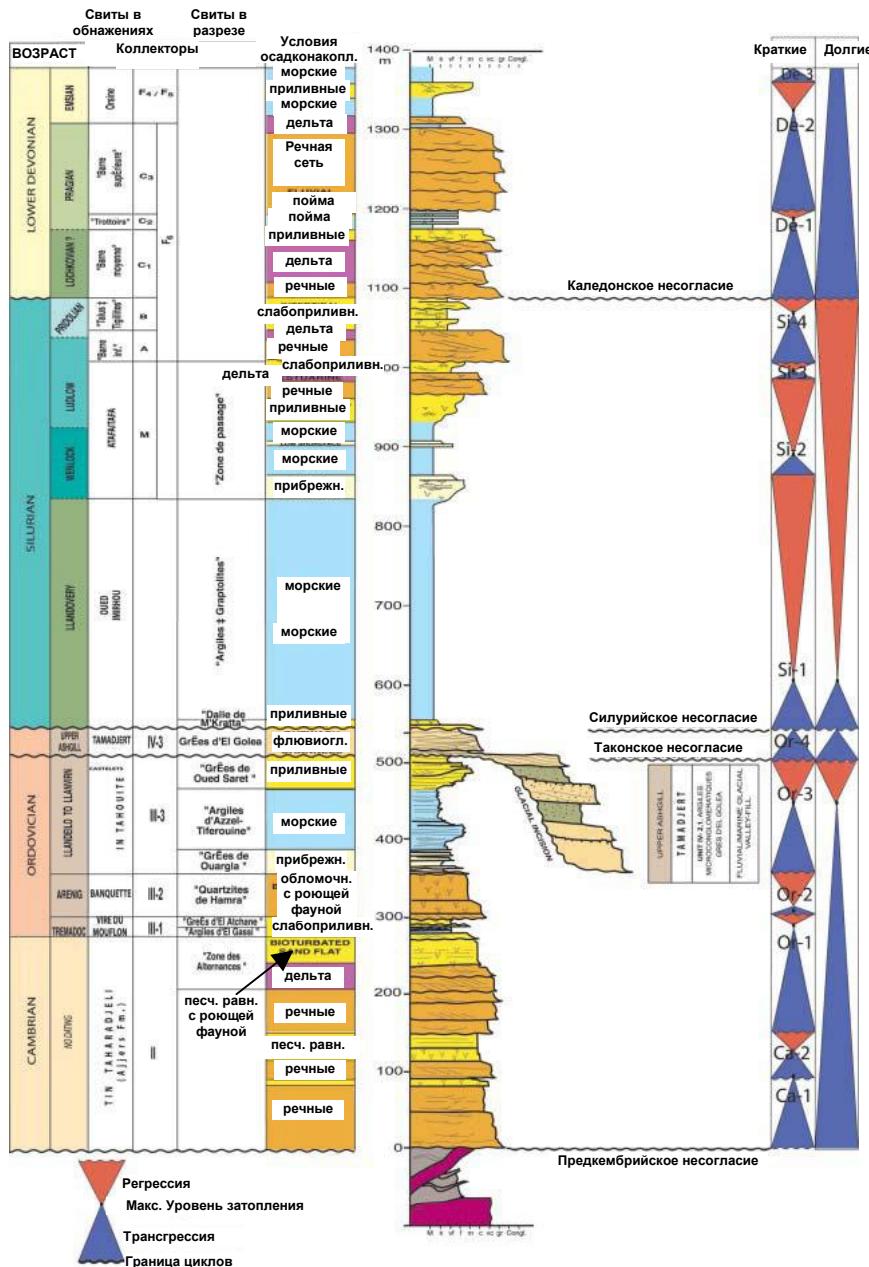


Рис. 2. Геохронологическая шкала отложений нижнего палеозоя Тассили Н'Аджер и история геологического развития района по результатам работ вдоль дороги Джанет-Иллизи (рис. 1). Литология и возраст в обнажениях даны по (Beuf et al., 1971), в разрезе – по (Claraq, 1963) и (Jardine and Yapaudjian, 1968). Названия свит см. в тексте.



Рис. 3. Предкембрийское несогласие к западу от Джанета. Песчаники кембрия-ордовика перекрывают смятые в складки граниты и докембрийские осадки.

бараах, а среднезернистые песчаники неопределенной структуры, с обильными следами роющих животных, характерны для обширных мелководных участков моря.

Количество следов возрастает вверх по разрезу, где присутствуют иглокожие *Skolithos* и *Cruiziana*. Появление последних в этих фаунах говорит об ускоренном отступлении речных систем в условиях крупной трансгрессии. В обнажениях датировать песчаники Тин Тахарджели не удалось и их в целом относят к кембрию или нижнему ордовику. В разрезе этой формации соответствует коллектор «Горизонт 2» (Unit II) который является основным на гигантском нефтяном месторождении Хасси-Мессуд.

Свитой «козьей тропы» ('Vire du Mouflon') сложена осыпью, средней мощностью около 50 м, вдоль обрыва Тассили (рис. 4). Свита козьей тропы представлена тонкослоистыми тонкозернистыми кварцитовыми песчаниками с волнистым напластованием с прослойями алевритов. В изобилии присутствуют следы роющей фауны иглокожих *Cruiziana*, в том числе *Bilobites*, *Harlania*, и др. В этих тонкослоистых отложениях встречаются также грубозернистые песчаники с

разнонаправленной сигмобразной отдельностью. Наличие мощных отложений с такими признаками говорит об условиях дельты реки, заливаемой приливами, при этом глубина формирования уменьшается вверх по разрезу. По фауне брахиопод (*Lingula*) и пластинчатожаберных (*Palearca*) отложения датируются (Legrand, 1964) ранним ордовиком. Свита козьей тропы формировалась в обстановке, близкой к приливной зоне или в промежутке между периодами приливных условий. Отложения свиты являются первыми (самыми древними) из фаций открытого моря в районе Тассили. Эти мелководные морские фации в разрезе переходят в более глубоководные морские глины Эль-Грасси ('Argiles d' El-Grassi'). Отложения верхней части свиты козьей тропы, возможно, аналогичны прибрежной фации песчаников Эль-Ачан ('Gres d'El Atchane') в разрезе. Эти отложения известны как коллектор «Горизонт III-1» бассейнов Иллизи и Беркине. По фауне граптолитов (Legrand, 1964) и Chitinozoa (Paris et al., 2000) отложения Эль-Грасси датируются тремадокской эпохой.

Свитой «Скамья» ('Banquette') сложена массивная верхняя скала во Внутреннем Тассили. (рис. 4). В низах залегают грубозернистые песчаники с разнонаправленной сигмобразной

отдельностью. По морфологии царапин отложения сформированы в условиях речных дельт и баров. Выше по разрезу свита «Скамья» сложена, в основном, окремнелыми песчаниками от средне-до грубозернистых, с невыраженной структурой, с обильной фауной *Skolithos*. В скважинах в верхах свиты отмечаются также пласти с фауной *Daedalus*, образующие реперный горизонт. В свите «Скамья» представлена резкая эрозионная поверхность (базис эрозии), срезающая верхи свиты козлиной тропы. На грубозернистых базальных отложениях залегают кварциты со следами роющей фауны, с увеличивающимися размером зерна и мощностью пластов. В верхах формации встречаются пустоты и переслаивания, что говорит о подтоплениях, предшествующих общему подъему воды, которому соответствует формация Ин-Тахуит (In Tahouite). Объяснить происхождение свиты «Скамья» непросто, поскольку структура осадков искажена работой роющих животных. На региональном уровне, как ни странно, фациальный состав выдержан (Beuf et al., 1971), что говорит о существовании неглубокого моря с очень малым уклоном дна. В таком случае следует считать, что эти песчаники образуют насыпь обломочного материала в мелководном



Рис. 4 Верхняя часть песчаников Тин Тахарджели (Горизонт II), свита «козьей тропы» и свита «Скамья» (хамринские кварциты), слагающие Внутреннее Тассили. Высота скалы – 150 м.

море. В разрезе бассейнов Иллизи и Беркине свите «Скамья», возможно, соответствуют хамринские кварциты ('Quartzite de Hamra'), образующие коллектор «Горизонт III-2». Трещиноватые разности хамринских кварцитов являются важным коллекторами, в обнажениях также видны признаки трещиноватости (рис. 5). Обнаруженные в скважинах глинистые прослои в хамринских кварцитах датируются аренигским временем.

На свите «Скамья» согласно залегает формация Ин-Тахуит. Она состоит в основном из алевролитов и тонко- и очень тонкозернистых песчаников со следами работы роющей фауны иглокожих *Skolithos* и *Cruziana*. В низах формации лежат тонкозернистые песчаники с волновой рябью и бугристыми поверхностями напластования, отложенные в прибрежной обстановке при низком стоянии уровня моря. Вверх по разрезу песчаники быстро переходят в алевролиты с тонким рисунком следов работы роющей фауны, отложенные в открытом море в пределах шельфа. Уменьшение размера зерна в нижней половине формации связано с увеличением глубины моря в ходе длительной трансгрессии. В верхней части формация Ин-Тахуит представлена песчаниками замковой свиты ('Les Castelets Member'), сформировавшимися в прибрежной и приливной зоне. По фауне брахиопод и пластинчатожаберных (Legrand, 1964) возраст низов формации Ин-Тахуит определен как аренигский. Базальные песчаники формации Ин-Тахуит аналогичны, возможно, аренигским (Oulebsir and Paris, 1993) песчаникам Уаргла ('Gres de Ouargla'), известным по скважинам. Глинистая часть формации аналогична глинам Аззель-Тиферун ('Argiles d'Azzel-Tifergouine') датируемым (Paris et al., 2000; компания Sonatrach, неопубликованные материалы) аренигской и льянделоской эпохами. Верхние песчаники могут соответствовать раннельянделоским (Oulebsir and Paris, 1993; Paris et al., 2000) песчаникам Уд Саре ('Gres de Oued Saret'). В разрезе бассейнов Иллизи и Беркине формация называется также «Горизонт III-3».

Ледниковые долины позднего ордовика

Подошва формации Тамаджерт (Tamađjert) является эрозионной поверхностью, связанной с долинами меридионального простирания шириной 1-3 км (Beuf et al., 1971) и более в бассейнах на западе Алжира.



Рис. 5. Хамринские кварциты в долине Ихерир. Видна трещиноватость в кварцитах. Человеческая фигура приведена для масштаба.



Рис. 6. Формация Ин-Тахуит на востоке долины Ихерир, сложенная морскими алевролитами и прибрежными песчаниками. Глубина долины около 200 м.

Такие врезы обнаружены по всей северной части Гондваны: в Алжире (Beuf et al., 1971), Ливии (Blanpied et al., 2000; Le Heron et al., 2004; Sutcliff et al., 2000), Мавритании (Ghienne and Deupoux, 1998) и Саудовской Аравии (Vaslet, 1990). Врезы образованы ледниками во время короткого оледенения. Рассматриваемая область находилась очень близко к Южному полюсу, где в раннеашигильское (гирантское) время формировалась ледовая шапка (Brenchley et al., 1994; Semtner et al., 1997).

Ледниковая долина (рис. 6), наблюдавшаяся в районе Ихерир (Iherir) детально исследована (Beuf et al., 1971). Ледниковая долина прорезает формацию Ин-Тахуит до свиты «Скамья», которой сложено современное дно долины. Глубина вреза превосходит 150 м. В бортах

долины наблюдаются небольшие разломы и гравитационные осьпи (рис. 7). Главная долина шириной 2 км ориентирована с севера на юг. Долина выполнена очень неоднородным и разнообразным материалом (рис. 6). В заполняющем материале видны ледниковые площадки и штриховка, возникшие при многократном наступлении и отступлении ледника. В низах долины крупными, до 15 м в высоту, пачками лежат разнородные тонкозернистые песчаники, переходящие у окончания ледника в тонкослоистые турбидиты. Отложения часто деформированы и осложнены оползневыми явлениями. Эти осадки сформировались в дельтах Гильберта (конусах выноса?) при отступлении ледника. Эти дельты сформировались благодаря обилию

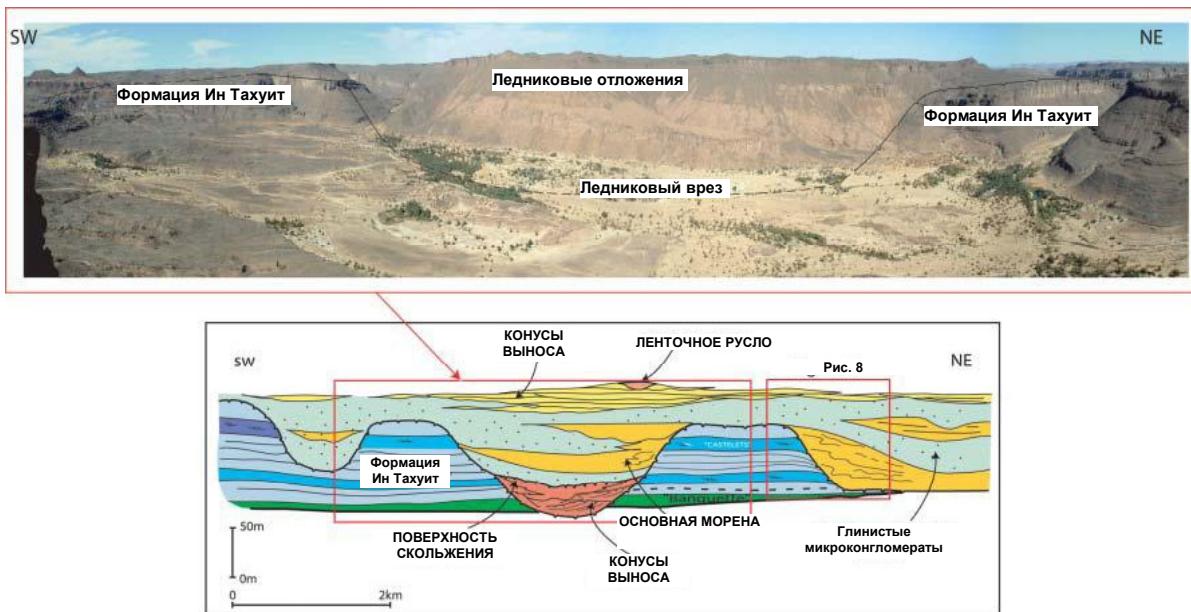


Рис. 7. Врез ледниковой долины Ихерир в формацию Ин-Тахуит и вариант строения ледниковых отложений. Положение объекта см. рис. 1.

воды и интенсивному течению при таянии ледника.

Выше по разрезу долина заполнена тонко- и среднезернистыми, плохо отсортированными песчаниками без выраженной структуры. Пласти часто смяты и размыты водой. Отложения сформировались, возможно, при массовом переносе материала водой, в изобилии поступавшей при таянии ледника. В песчаниках встречаются пласти глинистых плохо отсортированных песчаников и алевролитов, образующих сланцеватую толщу, в которой находятся грубые зерна кварца и кварцевый гравий. Эти фации называют диамиктными, их происхождение связывают с отложением материала, перенесенного айсбергами в межледниковые.

Распространенные на большой территории песчаники заполняют верхнюю часть долины. На этом уровне отмечаются крупные участки отложений дельты Гильберта, раскрывающихся на север. Наконец, в самых верхних частях долины находятся лентовидные русла с тонкозернистыми песчаниками неясного происхождения (Hirst et al., 2002). К этим извилистым руслам на поверхности плато приурочены крупные малоамплитудные складки с малым периодом. В разрезе бассейнов формация Тамаджерт называется

гетерогенным коллектором «Горизонт IV» (Hirst et al., 2002). Он датируется (Oulebsir and Paris, 1993) поздним аштиллом.

Силурийские отложения

Подошва силурийских отложений отмечается региональной эрозионной поверхностью несогласия с пологим рельефом, на которой залегают

грубообломочные песчаники. Песчаники находятся в понижениях рельефа поверхности и содержат фации водных потоков и приливные. Морфология их, возможно, соответствует русловой сети водотоков и дельт, сформировавшейся в ходе изостатического поднятия после таяния ледовой шапки и впоследствии затопленной. Сеть долин перекрыта

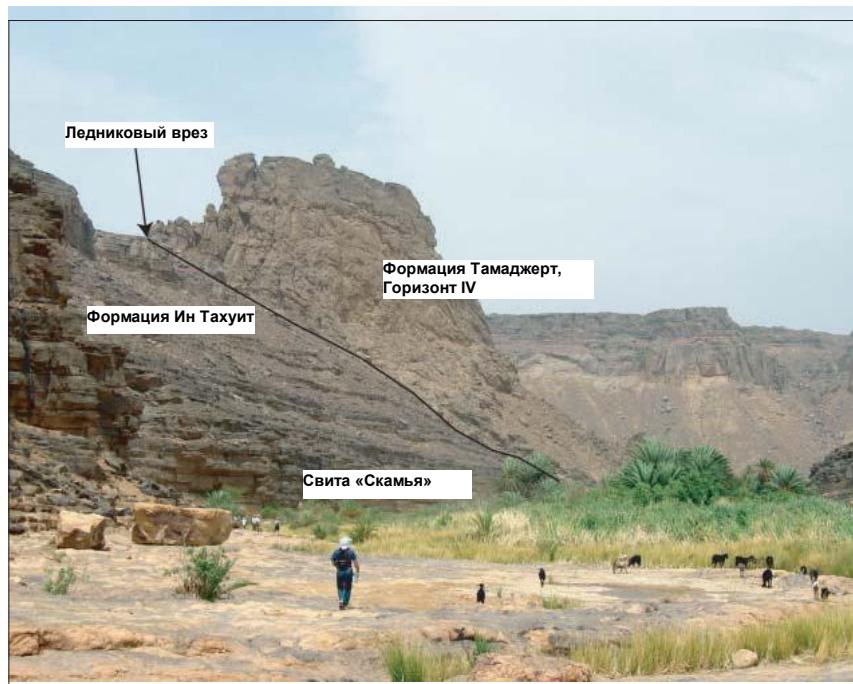


Рис. 8. Долина Ихерир. Врез края ледниковой долины в формацию Ин Тахуит

песчаниками со следами работы роющей фауны, сформировавшимися в ходе трансгрессии. В разрезе Иллизи и Беркине этим отложениям соответствует «стена М'Кратта» ('Dalle de M'Kratta'). Возраст их не определен, считается (Oulebsir and Paris, 1993), что они могут быть отнесены к позднему ордовику.

Выше по разрезу залегает формация Уд Имирху (Oued Imirhou), в разрезах – «граптолитовые глины» ('Argiles a Graptolites'), представленная алевритистыми слюдистыми сланцами, датируемыми эпохой лияндовери в низах и верхним лудлоу в верхах (неопубликованные отчеты, Legrand 1981). В скважинах бассейна Иллизи в низах граптолитовых глин выделяется, по крайней мере, три слоя богатых органикой радиоактивных сланцев. В плане они приурочены к понижениям рельефа подошвы бассейна, где были бескислородные условия и сохранились высокие значения ТОС (Luning et al., 2000; Lloydell, 1998). В верхней половине граптолитовых глин нарастают доли алевритов и песков.

На граптолитовых глинах согласно залегает формация Атрафайтафа (Atafaitafa). Формация представлена серией морских и прибрежных отложений, в которых вверх по разрезу возрастает размер зерна и увеличивается доля мелководных отложений. В песчаниках отмечаются буристые поверхности напластования, волновая рябь и сигмоидная отдельность. В верхах формации наблюдаются русловые отложения (рис. 9). Эти осадки сформировались в прибойной и приливной обстановке в ходе силурийской регрессии. В разрезе бассейна Иллизи формация Атрафайтафа соответствует «зоне прохода» ('Zone de passage') и «Горизонтам М» ('M Units'). По фауне Chitinozoa возраст выходящих в обнажениях низов прибрежных осадков определен как венлок, севернее, в бассейне Иллизи, отмечаются осадки возраста лудлоу (Boumendjel et al., 1988; Hennicke 2002).

Выше по разрезу залегает формация «Нижняя грязь» ('Barre inférieure'), подошва которой представляет собой выветрелую поверхность, согласно залегающую на «Горизонтах М». «Нижняя грязь» сложена грубозернистыми песчаниками с троговой и таблитчатой отдельностью, залегающими в пересекающихся слaboискривленных руслах. Направление течения говорит

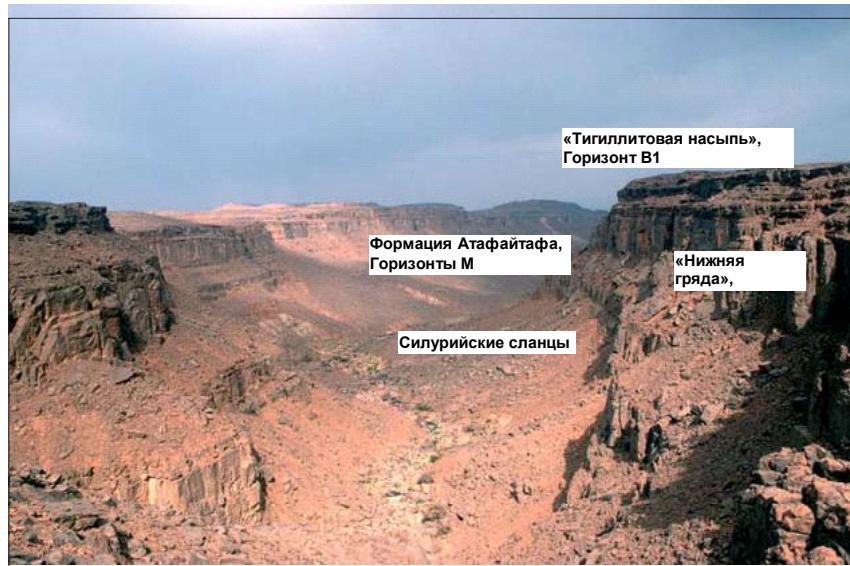


Рис. 9. Отложения верхнего силура на краю плато Фаднун. Глубина каньона около 200м.

о переносе в северном направлении. В верхах «Нижней грязи» отмечаются признаки приливного воздействия в виде разнонаправленной сигмоидной отдельности, связанные с протоками речных дельт и барами. (Hennicke, 2002). В низах «Нижней грязи» отмечается смещение фаций вниз по разрезу, связанное с относительным понижением уровня моря. Возобновившаяся деятельность речных систем размыла нижележащие морские осадки. При последующей трансгрессии речные системы отступили, а с ними и области развития дельтовых фаций. В разрезе это подразделение называется «Горизонт А».

На «Нижней грязи» согласно залегает «тигиллитовая насыпь» ('Talus a Tigillites'). Она сложена в основном тонкослоистыми тонкозернистыми песчаниками со следами работы роющей фауны с прослоями более грубозернистых песчаников с сигмоидной отдельностью. Эти осадки формировались на мелководье при слабом приливном воздействии в обстановках от слабых приливных равнин до илистых и песчаных равнин в промежутках между периодами приливного воздействия. Самые верхи разреза срезаны каледонской поверхностью несогласия. В разрезе эти отложения называются («Горизонт В») и по скважинам датированы (Hennicke, 2002) возрастом придоли.

Отложения раннего девона

Граница силура и девона связана с тектоническими событиями и значительным понижением уровня моря, повлиявшим на все окраины

Гонданы. Образовавшаяся выветрелая поверхность незначительного углового тектонического несогласия называется Каледонскими несогласием. В южной части бассейна Иллизи следы эрозии, связанной с несогласием, более заметны, чем в северной. Осадки верхнего придоли в обнажениях отсутствуют, но сохранились севернее, в бассейне Иллизи (Hennicke, 2002). Эти наблюдения говорят о том, что в каледонскую эпоху вся область надвинулась на северо-запад, а юго-восток бассейна Иллизи приподнялся. Врезы долин в основание свиты «Влажной грязи» ('Barre Moyenne') описаны также (Hennicke, 2002) в разрезе месторождения Тин-Фуйе (Tin-Fouye).

«Влажная грязь» залегает на каледонском несогласии. Свита сложена грубозернистыми песчаниками с троговой и таблитчатой отдельностью, залегающими в переплетенных системах водотоков. Выше по разрезу залегают песчаники с крупноблочной искривленной и таблитчатой, а также сигмоидной отдельностью. Эти фации связываются с дельтовыми протоками и барами, причем приливное воздействие усиливается вверх по разрезу. В бассейне Иллизи эти породы называются «Горизонт С1». Отложения «Влажной грязи» не поддаются датировке ни в обнажениях, ни в разрезе; песчаники обычно относят к лошковскому времени.

На «Влажной грязи» согласно залегает «тротуарная» ('Trottoirs') свита (рис. 10). Свита представлена чередованием зеленоватых алевритистых аргиллитов и

тонкозернистых песчаников, отложенных в пойменной обстановке. Отмечаются также лентовидные русла, выполненные очень грубозернистыми песчаниками с троговой отдельностью и с развитыми береговыми валами. Следует отметить, что в тротуарной свите впервые отмечаются следы работы корневых систем.

Растительность появилась на земле в позднем силуре, а в течение раннего девона колонизировала сушу. Распространение растительности оказало существенное влияние на динамику потоков, поскольку растения стали задерживать в поймах тонкозернистые осадки. Свита сформировалась во время трансгрессии, которая способствовала отложению пойменных осадках в долинах рек. Эта свита, называемая в разрезе бассейна Иллизи «Горизонтом C2», по остаткам пыльцы датируется пражским временем.

Подошва свиты «верхней гряды» ('Barre Supérieure'), перекрывающей тротуарную свиту, является согласной эрозионной поверхностью. Мощность свиты составляет около 50 м (рис. 10). Она представлена грубозернистыми песчаниками с троговой и таблитчатой отдельностью. Песчаники откладывались в богатой песком долине с переплетенными руслами. В самых верхах свиты присутствуют дельтовые протоки, что говорит о начале эмской трансгрессии. Отложения «Влажной гряды» не поддаются датировке ни в обнажениях, ни в разрезе, и обычно относятся к пражскому времени. В разрезе бассейна Иллизи эти отложения называют «Горизонт C3».

Отложения орсинской (Orsine) формации датируются эмским временем по обильным остаткам макрофауны. В формации представлены сланцы и алевролиты открытого моря. Подошва формации является трансгрессионной поверхностью, прослеживаемой в региональном масштабе. Пески прибрежных и приливных зон, все более глубоководные вверх по разрезу, приурочены, в основном, к поднятиям рельефа, а в разрезе образуют коллекторы F4/F5.

История геологического развития

В отложениях верхнего палеозоя выделяются четыре длительных цикла (рис. 2). Они сравнимы с циклами Вейля второго порядка (Vail et al., 1978) и соответствуют крупным тектоническим и климатическим событиям, действовавшим на границы Гондваны (Sharland et al., 2001).

Первый длительный цикл лежит между предкембрийским несогласием и таконским несогласием (верхний ордовик). Как говорилось выше, предкембрийское несогласие – это крупная эрозионная поверхность, соответствующая эрозии Панафриканского пояса. Отложения от кембрийских до верхнеордовикских соответствуют трансгрессионной части цикла. На предкембрийском несогласии залегают недатированные, относимые обычно к кембрию, речные системы формации Тин-Тахараджели. В верхах формации нарастает влияние приливных, а затем и морских условий, что говорит об общем отступлении речной системы. Шельфовые осадки

открытого моря – глины Эль-Гасси (а в обнажениях – свита «козьей тропы») – отмечают начало трансгрессии моря с северо-запада. В этих сланцах находится максимальный уровень затопления (МУЗ) этого цикла. Регressive часть цикла представлена верхней частью формации Ин-Тахуит (песчаники Уд Саре). Верхнюю границу цикла отмечают большой перерыв во времени и эродированная поверхность небольшого углового несогласия. Отложения позднелъянделоского и карадокского возраста нигде в Алжире не отмечены, хотя сохранились в горах Антиатласа в Марокко (Oulebsir and Paris, 1993; Paris et al., 2000; Bourahouh et



Рис. 10 Речные фации нижнего девона в западной части плато Фаднун.

al., 2004). Таким образом, в позднем ордовике в Алжире шли интенсивные эрозионные процессы. Соответствующее тектоническое несогласие, называемое Таконским, часто принимали за следы ледниковой эрозии в ашгильское время, сразу после таконских тектонических событий.

В пределах этого длительного цикла выделено пять циклов третьего порядка. Три первых (Ca-1, Ca-2, Og-1) соответствуют циклам трансгрессии и регрессии в песчаниках кембрия-ордовика (рис. 2). МУЗ третьего цикла соответствует свите козьей тропы (глиням Эль-Гасси). Хамринские кварциты образуют полный цикл (Og-2), с эрозионными несогласиями в подошве и кровле. Цикл Og-3 соответствует циклам трансгрессии и регрессии в формации Ин-Тахурит.

Короткое оледенение ашгильского времени образует полный, хотя и очень короткий, цикл. Здесь причиной несогласия является эвстатическое понижение уровня моря в связи с оледенением. По заполнению долин выделяется по крайней мере три этапа оледенения (Ghienne and Deynoux, 1998; Le Heron et al., 2004). Длительность цикла очень мала, возможно, менее одного миллиона лет, но амплитуда изменений уровня моря достигала 200 м и более. За быстрым таянием льдов последовало изостатическое поднятие (Beuf et al., 1971; Hirst et al., 2002) на границе ордовика и силура, которое отмечено обширной эродированной поверхностью несогласия с пологим рельефом (подошва «стены М'Кратта»).

Третий длительный цикл начинается с несогласия в подошве «стены М'Кратта» и образования нижнесилурийских сланцев. Формирование и погребение радиоактивных «горячих сланцев» шло, возможно, в бескислородных условиях в бассейнах с пологим рельефом на территории Сахарской платформы (Luning et al., 2000), когда понижения рельефа все сильнее затапливались. В таком случае МУЗ цикла второго порядка должен находиться выше «горячих сланцев». Выше МУЗ регressive часть цикла соответствует развитию прибрежных и приливных валов формации Атрафайтафа. Верхнесилурийская «Нижняя гряда» в обнажениях приближенно отмечает границу продвижения. Выделяется по крайней мере четыре коротких цикла третьего

порядка (Si-1 – Si-4), но силурийские сланцы открытого моря, возможно, сформировались более чем за один цикл. Подошва «Горизонта А» может соответствовать сильному падению уровня моря и речной эрозии (Si-3).

В подошве четвертого цикла лежит каледонское несогласие, связанное с тектоническими событиями на границе силура и девона, повлиявшиими на большую часть окраин Гондваны, и приведшими к сильному понижению уровня моря. Часть цикла, соответствующая низкому стоянию, состоит из речных отложений свит «влажной гряды» (Горизонт C-1), тротуарной (C2), «верхней гряды» (C3), которая является еще одним речным комплексом, развитым во всем бассейне. Трансгрессионная часть цикла начинается с затопления в эмсское время, что прослеживается во всем бассейне Иллизи. Последовательность более и менее глубоководных обломочных шельфовых осадков прослеживается до среднего девона. Описание верхней части цикла выходит за рамки настоящей работы.

В этом длительном цикле выделено по крайне мере три коротких цикла (De-1 – De-3). Первый соответствует трансгрессионному развитию после формирования каледонского несогласия от «влажной гряды» до развития прибрежной равнины «тротуарной» свиты. Эта тенденция прерывается эрозионной поверхностью в основании речных отложений «верхней гряды», где прослеживается трансгрессионное развитие. МУЗ цикла De-2 находится в эмсских сланцах, за образованием которых последовала эмсская регрессия.

Выводы и перспективы

Породы нижнего палеозоя, выходящие в обнажениях Тассили Н'Аджер соответствуют южной границе бассейна Иллизи – крупной нефтегазоносной провинции в Алжире. На этих обнажениях описан опорный разрез, что позволяет лучше понять распределение коллекторов в масштабах бассейна, и описана история геологического развития. На уровне отдельных коллекторов данные по обнажениям применимы для описания типов неоднородностей, которые влияют на проницаемость в процессе добычи.

В масштабах бассейна отложения, выделенные в обнажениях, могут быть соотнесены с отложениями разреза бассейна Иллизи. В этом медленно погружающемся бассейне содержание морских фаций нарастает вверх по разрезу и с севера на юг. Следует, однако, ожидать резких изменений фациального состава и мощностей в окрестностях положительных форм палеорельефа, которые были активны во время осадконакопления. Отложения нижнего девона, например, полностью отсутствуют выше поднятия Тихембока (Beuf et al., 1971). Поднятие Ахара (Ahara) между Беркине и Иллизи также было активным в течение большей части раннего палеозоя.

На уровне пласта неоднородность коллектора вытекает из неоднородности осадков, растрескивания и диагенеза. Неоднородность осадковпрямо связана с процессом осадконакопления. Речные осадки нижнего палеозоя образуют сплошные песчаные покровы регионального масштаба с участками сланцев и алевритов в отдельных пластах. Мелководные морские отложения имеют различную структуру, в зависимости от преобладающих процессов при формировании осадков. Перекрывающиеся дельтовые протоки и бары образуют коллектоны сложного строения. Наоборот, прибрежные фации с преобладанием штормовых условий или волнения образуют однородные коллектоны с малыми изменениями свойств по площади и глубине.

Нижнепалеозойские коллектоны могут быть окремелыми и сцепментированными в ходе диагенеза. При этом трещиноватость увеличивает проницаемость коллектора. Изучение связи диагенеза и трещиноватости является широким полем для исследований, которые объяснят особенности работы коллекторов на ряде месторождений Алжира.

Благодарности

Авторы благодарят руководство компаний Sonatrach и IFP за разрешение на публикацию этой работы, и особенно Д. Тахериста (D. Takherist) из Sonatrach и Л. Монтадерта (L. Montadert) из Beicip-Franlab за содействие в полевых работах. Транспортное обеспечение этих работ предоставлено Sonatrach. Датировки выполнили Ф. Пари (F. Paris) из Университета им. Рене I (Rennes I University) и К. Буменджель (K. Boumendjel) из Sonatrach CRD. Мы особо

благодарим Р. Дешама (R. Deschamps) из IFP и Д. Анниша (D. Henniche) из Sonatrach CRD, а также их коллег за помощь в проведении полевых работ. Мы также благодарим руководство Национального парка «Тассили» за разрешение на работы.

Литература

- Bennacef, A., Beuf, S., Biju-Duval, B., De Charpal, O., Gariel, O., and Rognon, P. [1971] Example of cratonic sedimentation: Lower Paleozoic of Algerian Sahara. AAPG Bull., 55, 2225-2245.
- Beuf S., Biju-Duval B., De Charpal, O., Rognon, P., Gariel, O., and Bennacef, A. [1971] Les gres du Paleozoique inferieur du Sahara. Sedimentologie et discontinuites. Evolution d'un craton. Publ. Inst. Fr. Petr., Coll. Sci. Tech. Petr. 18. Editions Technip, Paris.
- Blancpied,C., Deynoux, M., Ghienne, J.F., and Rubino, J.L. [2000] Late Ordovician Glacially Related Depositional Systems of the Gargaf Uplift (Libya) and comparisons with correlative deposits in the Taoudeni Basin (Mauritania), in Geo- logical Exploration in Murzuq Basin, Eds, M.A. Solav, M.A. and Worsley, D., 485-507.
- Boote D.R., Clark-Lowes, D.D., Traut, M.W. [1998] Paleozoic Petroleum systems of North Africa, in Macgregor, D.S., Moody, R.T.J., and Clark-Lowes, Eds, Petroleum Geology of North Africa, Geo- logical Soc. Sp. Publ. 132, 7-69. Boudjema, A. [1987] Evolution struc- turale du bassin petrolier 'Triasique' du Sahara Nord oriental, (Algerie). These, Universite Paris Sud-Orsay. Boumendjel, K., Loboziak, S., Paris, F., Steemans, P., and Streel, M. [1988] Bios- tratigraphie des miospores et des chitino- zoaires du Silurien Supérieur et du Devonien dans le bassin d'Illizi (S.E. du Sahara algerien). Geobios, 21, 329-357.
- Brenchley, P.J., Marshall, J.D., Carden, G.A.F., Robertson, D.B.R., Log, D.G.F., Meidla, T., Hints, L., and Anderson, T.F. [1994] Bathymetric and isotopic evidence for a short-lived Late Ordovician glacia- tion in a greenhouse period. Geology, 22, 295-298.
- Claracq, P., Couraud, G., and Aymond, J. [1963] Le Devonien inferieur du bassin d'Illizi (ex Fort Polignac). VI Congres mondial du Petrole, Frankfort, Section 1, 14, 1-92.
- Dubois, P., Beuf, S., and Biju-Duval, B. [1967] Lithostratigraphie du Devonien inferieur greseux du Tassili N'Ajjer, in Colloque sur le Devonien inferieur et ses lim- ites, Rennes. Mem. Bur. Rech. Geol. Min., Paris, 33, 29-81.
- Ghienne, J.F. and Deynoux, M. [1998] Large-scale channel fill structures in Late Ordovician glacial deposits in Mauritania, western Sahara. Sedimentary Geology 119, 141-159.
- Henniche, D. [2002] Architecture et modele de depots d'une serie sedimentaire Paleozoique en contexte cratonique: le Siluro-Devonien du Bassin d'Illizi (Sahara Oriental, Algerie). These, Univer- site de Rennes.
- Hirst, J.P.P., Benbakir, A., Payne, D.F., and Westlake, I.R., [2002] Journ. Petr. Geolo- gy 25, 297-324.
- Jardine, S., and Yapaudjian L. [1968] Lithostratigraphie et palynologie du Devonien- Gothlandien du Bassin de Poli- gnac (Sahara). Rev. Inst. Fr. Petr. v. XXIII, 4, 439-468.
- Killian, C. [1922] Apercu general de la structure des Tassilis des Ajers. C.R. Acad. Sci. Paris 175 825-827.
- Legrand, P. [1981] Decouverte de nou- veaux gisements fossiliferes dans les gres inferieurs du Tassili N'Ajjer. C.R. Soc. Geol. Fr., 14-15
- Legrand, P. [1981] Paleogeographie du Sil- urien au Sahara Algerien. Notes et Memoires, 16, Com. Fr. Petr.
- Le Heron, D., Sutcliffe, O., Bourgig, K., Craig, J., Visentin, C., and Whittington, R. [2004] Sedimentary architecture of Upper Ordovician tunnel valleys, Gargaf arch, Libya: Implications for the genesis of a hydrocarbon reservoir. GeoArabia 9,137- 160.
- Lloydell, D., [1998] Early Silurian Sea- level changes. Geol. Mag. 135, 447-471. Luning, S., Craig, J., Loydell, D.K., Storch, P., and Fitches, L. [2000] Lower Silurian 'hot shales' in North Africa: regional distribution and depositional model. Earth Science Review 49, 121-200.
- Paris, F., Bourahrhou, A., and Le Herisse, A.L. [2000] The effects of the final stages of the Late Ordovician glaciation on marine palynomorphs (chitinozoans, acritarchs, leiospheres) in well NL-2 (NE. Algerian Sahara). Rev. Paleo. Palyno, 113, 87-104.
- Oulebsir and Paris, A. [1993] Nouvelles especes de chitinozoaires dans l'ordovicien inferieur du et moyen du nord-est du Sahara, algerien. Rev. Micropaleontol, 36, 257-280.
- Rubino, J.L. and Blanpied, C. [2000] Sed- imentology and sequence stratigraphy of the Devonian to lowermost Carboniferous succession on the Gargaf uplift (Murzuq basin, Lybia) in Geological exploration in Murzuq basin, (Eds, Sola, M.A. and Wors- ley, D.), Elsevier.
- Schandlmeier H., Reynolds P.O., and Semtner A.K. [1997] Paleogeographic-Paleotectonic atlas North-Eastern Africa, Arabia and adjacent area. Brookfield, Rotterdam.
- Sharland, P.R., Archer, R., Casey, D.M., Davies, R.B., Hall, S.H., Heward, A.P., Horbury, A.D., and Simmons, M.D. [2001] Arabian Plate Sequence stratigraphy. GeoArabia Sp. Publ. 2.
- Scotes, C.R., Cahagan, L.M., and Larson, R.L. [1988] Plate Tectonic reconstructions of the Cretaceous and Cenozoic basins. Tectonophysics, 155, 27-48. Semtner, A.K., Reynolds P.O., Schandlmeier H., and Klitsch, E. [1997] The late Ordovician (Ashgill, ca. 440 ma) in Paleogeographic-Paleotectonic atlas North-Eastern Africa, Arabia and adja- cent area, (Eds, Schandlmeier H., Reynolds P.O., and A.K.Semtner), Brook- field, Rotterdam.
- Sutcliffe, O., Dowdeswell, J., Whittington, R., Theron, J., and Craig, J. [2000], Cali- brating the Late Ordovician glaciation and mass extinction by the eccentricity cycles of Earth's orbit. Geology 28, 967- 970.
- Vail, P.R., Mitchum, R.H.Jr, Todd, R.G., Widmier, J.M., Thomson, S., Sangree, J.B., Bubb, J.N., and Hatlelid, W.G. [1977] Seismic stratigraphy and global change of sea level. - Seismic stratigraphy, Application to Hydrocarbon Exploration. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 26, 49- 212.
- Vaslet, D. [1990] Upper Ordovician glacial deposits in Saudi Arabia. Episodes 13, 147-161.