

ФОРМИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ САХАРЫ

Анисимов Леонид Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, 400074, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, e-mail: l_anisimov@yahoo.com

Шубин Михаил Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Волгоградский государственный университет, 400062, Российская Федерация, г. Волгоград, Университетский проспект, 100, e-mail: m-shubin@yandex.ru

Исследование формирования химического состава подземных вод Центральной Сахары и оценка их ресурсов проведены на примере анализа гидрогеологических условий кристаллического массива Хоггар и прилегающих к нему седиментационных бассейнов. Данные о минерализации и химическом составе вод в осадочных породах в бассейнах, примыкающих к Хоггару, показывают в основном их идентичность с водами кристаллического массива. Низкая минерализация подземных вод большинством исследователей объясняется благоприятными условиями инфильтрации в водоносные горизонты в плейстоцене, учитывая ливневый характер осадков и хорошую вертикальную проницаемость разреза. В то же время для объяснения широкого распространения пресных вод необходимо привлекать данные об оледенении Африканского континента в палеозое.

Ключевые слова: Центральная Сахара, кристаллические массивы, подземные воды, ресурсы, палеозойское оледенение

FORMATION OF FRESH UNDERGROUND WATERS RESOURCES OF THE CENTRAL SAHARA

Anisimov Leonid A., D.Sc. in Geology and Mineralogy, Professor, Volgograd State Technical University, 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation, e-mail: l_anisimov@yahoo.com

Choubin Mikhail A., D.Sc. in Geology and Mineralogy, Professor, Volgograd State Technical University, 100 Universitetskiy av., Volgograd, 400062, Russian Federation, e-mail: m-shubin@yandex.ru

The study of the formation of the chemical composition of groundwater in the Central Sahara and the assessment of their resources are carried out on the example of the analysis of hydrogeological conditions of the Hoggar crystalline massif and adjacent sedimentation basins. Data on mineralization and chemical composition of subsurface waters in sedimentary rocks in the basins adjacent to Hoggar show, basically, their identity with the waters of the crystalline massif. Most researchers is explained the low groundwater salinity by favorable conditions for infiltration into aquifers in Pleistocene, given the stormy nature of precipitation and good vertical permeability of the geological section. At the same time, to explain the wide spread of fresh water, it is necessary to involve data on the glaciation of the African continent in Paleozoic.

Keywords: Central Sahara, crystalline massifs, underground water, resources, Paleozoic glaciation

Широко известны данные о распространении крепких рассолов (до 200 г / л и выше) в докембрийских породах Канадского, Скандинавского щитов, кристаллических массивов Восточно-Европейской и Сибирской платформ. На этом фоне резким диссонансом выглядят данные о химическом составе вод кристаллических массивов Африканского континента, где распространены в основном пресные воды. Вопросы их формирования и условий залегания имеют не только теоретическое, но и большое практическое значение для организации систем водоснабжения значительных территорий с ограниченными в настоящее время водными ресурсами.

В 2010 г. гидрогеологи Британской геологической службы завершили ряд проектов по оценке запасов подземных вод Африки. Были собраны данные по гидрогеологическим картам, имеющимся в распоряжении правительства стран Африки, и 283 исследованиям подземных водоносных горизонтов. Новая детализированная карта, построенная ими, показывает, что многие государства, ныне обозначенные как «не имеющие водных ресурсов», на самом деле располагают огромными запасами пресной воды.

В своем интервью корреспонденту Би-би-си по вопросам науки Хелен Бонсор одна из авторов исследования отмечает, что впервые специалистам Британского геологического общества и Университетского колледжа Лондона удалось собрать воедино информацию о водоносных горизонтах по всему континенту. «Самые обширные запасы грунтовых вод скопились в Северной Африке, в больших подземных резервуарах в глубине осадочных пород – под Ливией, Алжиром и Чадом... Объемы этой воды таковы, что она могла бы покрыть территорию этих стран слоем в 75 метров толщиной, Это очень много». Далее Хелен Бонсор говорит, что до сих пор на подземные воды никто «не обращал внимания и не задумывался о них». Она надеется, что «новые карты откроют людям глаза на их потенциал» [20].

Такое заявление не совсем корректно, учитывая, что по гидрогеологии Африки имеется обширная литература. Тем более сами авторы отмечают, что «отсутствие качественных гидрогеологических карт по Северной и Западной Африке компенсируется многочисленными исследованиями локального и регионального уровня. В Центральной Африке как карты, так и информация об исследованиях немногочисленная».

Многочисленные исследования проводились французскими геологами до получения странами Северной Африки независимости. Они в основном касались районов северной Сахары, где широко представлены пресные воды в мезозойских (континенталь интерколера) и кайнозойских (континенталь терминал) отложениях. Из опубликованных работ, содержащих краткие сведения о распространении подземных вод в породах фундамента и палеозоя центральной Сахары, можно отметить труды А. Корне [12, 13, 14] и Ж. Дюрозоя [17]. Малочисленные опубликованные статьи и отчеты, посвященные вопросам гидрогеологии отдельных участков центральной Сахары, не содержали обобщающих сведений и достоверных оценок гидрогеологических условий территории.

В 70–80-х гг. прошлого века в Алжире советские гидрогеологи вместе с алжирскими коллегами проводили исследования по поискам подземных вод и оценке их ресурсов. Был опубликован ряд обобщающих работ по гидрогеологии Африки [3, 4, 8, 9]. Авторы данной статьи также проводили исследования в Алжирской Сахаре в 1971–1974 и 1980–1981 гг. К сожалению, не все результаты исследований опубликованы, хотя гидрогеология многих районов Африки до-

статочной необычной. Поэтому возникает ряд теоретических вопросов регионального и глобального уровня. Рассмотрение этих вопросов проведено на примере анализа гидрогеологических условий кристаллического массива Хоггар и прилегающих к нему седиментационных бассейнов в Центральной Сахаре.

Природные условия. Хоггар с административным центром в г. Таманрасете, Алжир, занимает площадь около 400 тыс. км² в центральной части Сахары. Район выделяется в особую морфологическую зону с абсолютными отметками поверхности 1500–3000 м над уровнем моря, с типично горным рельефом, резкими перепадами высот, узкими ущельями, небольшими плато и скалистыми грядками. Другая крупная морфологическая зона включает пенеппенизированные равнины кристаллического фундамента с абсолютными отметками поверхности от 800 м на юге до 1000–1500 м на севере и северо-востоке. Для неё характерен слабохолмистый рельеф, нарушаемый отдельными небольшими гранитными массивами и грядами песчаных дюн. Отмечается общее снижение рельефа от центрального массива Атакора к тассилийскому обрамлению (рис.).

Горный массив представляет собой ряд плосковершинных ступенчатых хребтов, вытянутых с севера на юг. В конце третичного и начале четвертичного периодов нагорье было приподнято (до 2000 м в центре – Атакоре) и разбито трещинами, по которым излились лавы и образовались вулканы. С севера на юг в пределах Ахаггара можно выделить следующие молодые лавовые плато: Тассилин-Аджер, Тассилин-Адрар, Тассилин-Анахев, Тассилин-Атакор, Тассилин-Тахалра. В результате выветривания образовались скальные останцы причудливых форм – итог работы ветровой эрозии.

Горная и равнинная зоны Хоггара и его осадочного обрамления имеют различные гидрометеорологические особенности. В горной части Хоггара среднегодовое количество осадков достигает 50 мм, в то время как в равнинных областях их количество снижается до 5–15 мм / год.

Гидрографическая сеть Хоггара представлена преимущественно сетью многочисленных сухих уэдов, стекающих по радиальным направлениям от Атакора. Большая часть крупных уэдов прорезает тассилийское обрамление Хоггара и теряется в песках окружающих равнин. В паводки, после ливневых дождей вода, в связи с отсутствием разработанных русел, разливается по равнине многочисленными широкими потоками. При этом паводковый сток исчезает в пределах пенеппенизированных равнин фундамента в радиусе до 100–150 км от Атакорского массива, расходясь на испарение и инфильтрацию в трещины и тектонические разломы горных пород.

На рассматриваемой территории, как и в других районах Сахары осадки выпадают в виде редких ливневых дождей. Яркую, хотя и типичную, картину такого явления описал Анри Лот [6] для района Форт Полиньяк, где русло крупного уэда с плато Тассилин-Аджер выходит на равнину бассейна Илизи. «... на Форт Полиньяк обрушивается настоящий проливной дождь... Вскоре уэд Илези превращается в поток; сначала он течет как бы нехотя, но постепенно набирает силу. На следующий день это уже бурная кипящая река шириной более трехсот метров, а вода, питающая ее, все прибывает сверху».

Равнины кристаллического фундамента и осадочное обрамление Хоггара – это типичная песчано-каменистая пустыня, практически безжизненная в южной и западной частях. Лишь в северных и северо-восточных частях Высоких Тассили ландшафт несколько оживлен за счет увеличения годового количества осадков от 5 до 15–25 мм. Редкие населенные пункты здесь находятся

В геологическом отношении ядро массива Хоггар образуют мощные комплексы кристаллических пород – гнейсы, гранито-гнейсы, слюдяные сланцы и амфиболиты общей мощностью 20000 м [1]. На востоке и северо-востоке Хоггара распространены менее метаморфизованные породы – гнейсы, сланцы, кварциты и известняки. Возраст комплекса определяется как среднепротерозойский. В периферийных частях кристаллического массива фундамент перекрыт осадочными породами, которые далее развиваются в крупные седиментационные бассейны.

Условия залегания подземных вод. На территории кристаллического массива Хоггар подземные воды распространены не повсеместно. Обнаруженные здесь горизонты грунтовых вод связаны преимущественно с русловыми отложениями уэдов и подстилающими их выветрелыми породами фундамента, с линейно вытянутыми участками крупных тектонических разломов, а также с базальтами, перекрывающими древнечетвертичные речные долины [11].

Грунтовые воды аллювиальных отложений наиболее широко распространены на склонах массива Атакор. Здесь на участках спрямления (в профиле) русел уэдов формируются довольно значительные по объему бассейны, часто питающие круглогодичные поверхностные водоемы. Оценка эксплуатационных запасов бассейна гидродинамическим методом показала возможность получения 3000 м³ / сутки с помощью линейного водозабора из трех скважин. При этом грунтовые воды горизонта русловых отложений и выветрелых пород фундамента отличаются повсеместно хорошим качеством и относительно неизменным во времени химическим составом.

Водоносный горизонт в зонах тектонических нарушений приобретает максимальную водообильность на участках пересечения крупных уэдов с мощными тектоническими разломами русел на незначительном удалении от Атакорского горного массива. На остальной территории запасы грунтовых вод в таких коллекторах незначительны. Значительная протяженность крупных разломов обеспечивает подземный сток от массива Атакор до осадочного обрамления Хоггара и таким образом способствует накоплению крупных запасов подземных вод в мощных коллекторах фанерозоя. Качество грунтовых вод в зонах тектонических нарушений пород фундамента хуже, чем в русловых отложениях, что объясняется особыми условиями водообмена в глубоких разломах.

Водоносный горизонт покровных базальтов распространен на участках развития базальтовых покровов, перекрывающих русла древних уэдов или непосредственно залегающих на кристаллических породах фундамента. Основная роль базальтов заключается в создании защитного экрана, перекрывающего водоносные горизонты русловых отложений и трещиноватых отложений фундамента. Глубина залегания уровня грунтовых вод колеблется от 2,5 до 44 м в зависимости от рельефа местности. Результаты опробования горизонта, как правило, показывают очень низкую водообильность. Качество грунтовых вод удовлетворительное – минерализация колеблется от 0,3–0,5 г / л до 1,0–1,7 г / л.

Формирование и режим подземных вод в пределах кристаллического массива Хоггар в целом связано с инфильтрацией атмосферных осадков. Областью питания подземных вод для всего массива является наиболее высокая центральная часть, где имеет место непосредственная инфильтрация атмосферных осадков в породы фундамента. В то же время значительные уклоны поверхности в этой зоне (от 0,007 до 0,01) не способствуют накоплению здесь

крупных запасов подземных вод, которые задерживаются лишь в русловых отложениях на спрямленных участках склонов. Учитывая малую долю инфильтрации осадков, основная часть их формирует паводковый поверхностный сток. Данный сток, выходя на равнины фундамента, поглощается тектоническими разломами и выветрелыми кристаллическими породами. Значительная часть стока в пределах равнин фундамента расходуется на испарение, тем не менее условия для накопления запасов подземных вод здесь более благоприятны, чем в горной части Хоггара.

Подземные воды отложений осадочного обрамления Хоггара на севере, востоке и юге Хоггара представлены толщей палеозойских морских отложений, на западе массив обрамляется мощными осадками промежуточного континентального цикла. В соответствии с этим, на севере выделяются палеозойские артезианские склоны крупных бассейнов Ахнет, Муидир и Аджер, на юго-востоке – бассейна Тафасассет, на юге – Тин-Серирин и на западе – примыкающая к Хоггару часть мезо-кайнозойского артезианского бассейна Танезруфт (рис. 1). Наиболее детальные гидрогеологические исследования были выполнены в пределах артезианских склонов на участках Тафасассет и Тин-Серирин.

Артезианский бассейн Тафасассет включает девонский и кембро-ордовикский водоносные комплексы.

Девонский комплекс распространен неравномерно, заметно расширяясь по площади в направлении с севера на юг. В отложениях девона выделены три основные толщи: верхняя, залегающая на поверхности лишь в восточной части участка мощностью до 100 м; средняя, сложенная аргиллитами и алевролитами мощностью до 70–150 м, и нижняя, содержащая крупнозернистые песчаники и гравелиты с редкими прослоями алевролитов общей мощностью свыше 200 м. По химическому составу воды девонских отложений относятся к сульфатно-гидрокарбонатным натриево-кальциевым с общей минерализацией 0,3 г / л (табл. 1).

Таким образом, по водообильности и качеству воды девонский водоносный комплекс бассейна Тафасассет представляется вполне перспективным для целей хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения. Наличие и использование подземных вод девона известно также в районе Тассилей Аджер (Форт Полиньяк).

Отложения кембро-ордовика повсеместно распространены в пределах артезианского склона синклинали Тафасассет, обнажаясь по периферии структуры. В направлении к её оси они заметно погружаются, следуя за тектоническими дислокациями фундамента. Породы перекрываются водоупорными отложениями силура и подстилаются породами фундамента.

Мощность обводненной зоны песчаников изменяется в направлении к центру синклинали от 50 до 150 м. По оси структуры наблюдается уменьшение мощности обводненной зоны с северо-запада на юго-восток от 150 до 90 м одновременно с уменьшением мощности кембро-ордовикских песчаников. Следует заметить, что полная мощность обводненной толщи песчаников в центральной и восточной частях структуры не установлена. Глубина залегания уровня подземных вод колеблется от 70 до 30 м от поверхности земли, уменьшаясь по направлению от западного борта синклинали к оси. В то же время абсолютные отметки статических уровней закономерно снижаются с северо-запада на юго-восток, следуя направлению потока подземных вод.

Таблица 1

Химический состав подземных вод Хоггара [11]

Местоположение, № скважины	Дата отбора пробы	Минера- лизация, г / л	Ионный состав, мг / л					
			Cl	SO ₄	HCO ₃	Ca	Mg	Na + K
Тафасассет, девон, кембро-ордовик								
Тафасассет, 200	06.01.1978	0,43	72	106	72	36	16	72
Тафасассет 201	02.03.1978	0,28	14	94	79	19	11	41
Тафасассет, 202	06.01.1978	0,22	14	77	48	15	4	41
Тафасассет, 203	26.02.1979	0,34	85	38	73	50	13	35
Тафасассет, 204	07.06.1979	0,43	106	75	85	68	20	28
Зоны тектонических нарушений								
Абанкор, 15	06.04.1971	1,81	399	427	152	154	125	107
Инрабир, 45	30.11.1972	2,75	556	1026	316	408	100	320
Таншафао, 47	04.04.1973	5,45	1213	1480	122	960	146	179
Лауни, 31	07.05.1971	2,39	564	842	91	408	46	249
Шахта В	23.11.1968	3,42	936	619	73	456	22	310
Русловые отложения								
Таманрассет, 37	14.02.1972	0,32	20	51	211	66	9	38
Тинамзи, 53	21.11.1973	0,44	17	69	212	21	6	95
Тинфелки, 31	02.11.1971	0,72	55	61	571	23	4	238
Тиририн, (колодец)	15.04.1979	1,68	447	496	146	48	11	508
Иссалян, 23	25.04.1971	0,48	32	106	189	48	8	75
Ин-Афалелах, (кол.)	14.04.1979	0,94	255	285	61	86	10	214
Силет, 169	19.11.1978	0,55	37	92	216	8	30	120
Мениет, 12	29.01.1974	0,66	24	160	276	56	3	127
Тин-Серирин, кембро-ордовик								
Скважина 1	07.04.1974	0,23	36	109	18	24	12	32
Скважина 6	28.04.1974	0,26	46	117	24	22	13	40
Скважина 7	08.05.1974	0,30	49	130	30	23	12	56
Иназауа (колодец)	25.11.1973	0,39	44	150	78	19	6	96
Скважина 65	07.2.1975	0,22	21	49	85	24	5	33
Скважина 16	10.05.1975	0,36	44	88	122	38	7	58

Основная область питания кембро-ордовикского водоносного горизонта расположена к северо-востоку за пределами описываемого участка, в горной зоне Хоггара, а область разгрузки – к юго-западу на территории Нигера. Кроме того, существует и местное питание, связанное с подрусловыми потоками уэдов. Условия для инфильтрации потока благоприятны в связи с широким распространением выходов кембро-ордовикских песчаников на поверхность в долине уэдов, а также вследствие интенсивной дислоцированности пород. Местная разгрузка горизонта не исключена по тектоническим разломам на питание девонского водоносного комплекса и трещиноватых зон в фундаменте ниже по потоку.

По результатам гидрогеологических исследований была проведена оценка эксплуатационных запасов подземных вод кембро-ордовикского водоносного горизонта в пределах северо-западной части артезианского склона бассейна Тафасассет. Подсчет запасов проводился для площади территории, составляющей 2520 км², в том числе площади распространения напорных вод – 1890 км². Средняя мощность водоносного горизонта в кембро-ордовикских отложениях по геологическим разрезам составляет 118 м, по напорной части пласта – 137 м.

Естественные запасы подземных вод горизонта в пределах упомянутой площади составляют $26,1 \text{ км}^3$, а естественные ресурсы – 123 л / с . Режим подземных вод кембро-ордовикских отложений характеризуется стабильностью, которая объясняется высокой водообильностью и глубоким погружением горизонта, а также приблизительным равенством приходной и расходной статей баланса.

По результатам химических анализов (табл. 1), подземные воды кембро-ордовикских отложений являются пресными с минерализацией $0,15\text{--}0,47 \text{ г / л}$, по жесткости – от очень мягких до умеренно жестких. Концентрация водородных ионов колеблется в пределах $6,8\text{--}8,1$, что характеризует воды как нейтральные или слабощелочные.

Артезианский бассейн Тин-Серирин является частью южного палеозойского обрамления Хоггара под общим названием Тассили Уан-Ахаггар. Поверхность территории представляет собой пустынную равнину, полого наклоненную в юго-западном направлении с отметками от 650 до 400 м . Гидрографическая сеть развита довольно широко в виде сухих русел уэдов. Крупнейшими из них являются Тин-Тарабин и Ирхархар, берущие начало с гор массива Атакор, а также Тин-Серирин. Его основное русло расположено на территории Нигера.

Геологическое строение бассейна Тин-Серирин в целом аналогично строению бассейна Тафасассет. Нижняя часть осадочного комплекса представлена отложениями кембро-ордовика. В их основании залегают базальные конгломераты мощностью от $0,3\text{--}1,5 \text{ м}$ до $10\text{--}15 \text{ м}$. Конгломераты перекрываются хорошо проницаемыми крупнозернистыми песчаниками с косою слоистостью и линзами гравелитов общей мощностью $240\text{--}260 \text{ м}$. Выше залегают мелкозернистые кварцевые песчаники, трещиноватые в верхней части, мощностью до 150 м . Водоупорные тиллиты мощностью от 0 до 35 м венчают разрез кембро-ордовика.

Отложения силура несогласно залегают на породах кембро-ордовика и представлены аргиллитами с прослоями алевролитов и песчаников максимальной мощностью $500\text{--}550 \text{ м}$. Отложения девона, широко распространенные в центральной части синклинали, представлены в нижнем отделе крупнозернистыми песчаниками и конгломератами с редкими прослоями алевролитов и аргиллитов мощностью до 350 м . В пределах территории широко развиты рыхлые четвертичные отложения эолового и аллювиального генезиса мощностью $10\text{--}20 \text{ м}$.

Гидрогеологические исследования в бассейне Тин-Серирин были сосредоточены, учитывая суммарную мощность палеозойских отложений порядка 1500 м , лишь в прибортовых зонах. Основным объектом изучения являлся водоносный комплекс кембро-ордовикских песчаников, имеющий большую мощность пород при их значительной водообильности.

Подземные воды кембро-ордовика имеют смешанный химический состав с незначительным преобладанием сульфатов (табл. 1), что в целом не отражается на хорошем качестве пресных вод с минерализацией от $0,06$ до $0,7 \text{ г / л}$. Минерализация обычно возрастает с удалением от бортов к оси синклинали и с увеличением глубины вскрытия водоносного горизонта. Все это соответствует схеме прямой гидрохимической зональности артезианских бассейнов. Как правило, подземные воды мягкие или умеренно-жесткие и обладают слабой щелочной реакцией.

Формирование водоносного горизонта тесно связано с атмосферным питанием на горных склонах Атакора. Оттуда по руслам уэдов и зонам тектонических нарушений поверхностный и подземный сток перемещается и аккумулируется в депрессиях фундамента, выполненных комплексом палеозойских отложений. Основная область разгрузки горизонта находится на территории Нигера, где распространение песчаников кембро-ордовика ограничивается выступом фундамента высотой 500 м в районе Тин-Мерсуа. Тем самым создается возможность перетекания подземных вод в промежуточные континентальные отложения.

Кроме кембро-ордовикского водоносного горизонта, нижнедевонские песчаники могут обладать значительной водообильностью, по аналогии с бассейном Тафасассет. Подземные воды, вскрытые в них отдельными колодцами на территории впадины Тин-Серирина, имеют химический состав и минерализацию, не отличающиеся от вод кембро-ордовика. Спорадически распространенные пресные грунтовые воды содержатся также в четвертичных отложениях, подстилаемых кембро-ордовикскими песчаниками. Эти воды, как правило, гидравлически связаны с подземными водами кембро-ордовика и не отличаются от них по составу.

Массив Хоггар окаймляется крупными артезианскими бассейнами: Илизи на севере, Мурзук на востоке (Ливия), Тауденни на юго-западе (Мали) и Уллимеден на юге (Нигер). Нижнепалеозойские отложения в этих бассейнах отличаются высокой водообильностью и содержат пресные воды.

Феномен повсеместного присутствия пресных вод в отложениях девона на больших глубинах (до 2000 м) в бассейне Илизи вызывает большой интерес у геологов и неоднократно отмечался в публикациях [2, 7]. Особенностью бассейна Илизи является то, что основной нефтегазоносный объект – пласт F₆, содержащий многочисленные залежи газа и легкой нефти, на значительной территории содержит пресные и маломинерализованные воды (на больших глубинах). Пласт F₆ раннедевонского возраста имеет среднюю толщину 200–300 м и представлен песчаниками с различной степенью глинизации, часто с хорошими коллекторскими свойствами. На площадях, граничащих с массивом Хоггар, песчаники выходят на поверхность, что позволяет предполагать инфильтрацию поверхностных вод в значительных объемах.

Условия формирования химического состава подземных вод. Основной особенностью кристаллических массивов Сахары является повсеместное распространение пресных вод. В ряде случаев их минерализация ниже 0,1 г / л, что кажется достаточно странным для одного из самых засушливых регионов мира. Данные химических анализов по Хоггару для пород различного возраста (табл. 1) позволяют оценить особенности компонентного состава подземных вод. Почти все пробы воды кембро-ордовикских и русловых отложений представлены пресными водами, в основном гидрокарбонатно-натриевого типа. Несколько более высокую минерализацию имеют воды зон тектонических нарушений.

Особенностью этих вод является высокое содержание сульфатов, что и объясняет повышение минерализации по сравнению с водами других районов. Следует заметить, что эти воды залегают в зонах, обогащенных сульфидными минералами [10]. Их окисление ведет к образованию серной кислоты, которая нейтрализуется породами, содержащими кальций. Его повышенные концентрации также фиксируются в этих водах.

Данные о минерализации и химическом составе вод в осадочных породах в бассейнах, примыкающих к Хоггару, показывают в основном их идентичность с водами кристаллического массива. По бассейну Илизи многочисленными анализами подтверждается распространение пресных и солоноватых вод в пласте F₆ нижнего девона на большой территории, примыкающей к Хоггару. Химические анализы, приводимые в таблице 2, показывают преобладание в составе вод натрия и гидрокарбонат-ионов. Содержание кальция и магния низкое. Следует обратить внимание на высокие концентрации HCO₃ в водах с минерализацией более 1 г / л.

Таблица 2

Химический состав подземных вод пласта F₆ бассейна Илизи [7]

Месторождение / № скважины	Интервал опробования	Минерализация, г / л	Концентрация ионов, мг / л					
			Cl	SO ₄	HCO ₃	Ca	Mg	Na + K
Эль Адеб-Лараш, 35	1472–1478	3,857	1135	200	970	290	90	957
Ла-Рекюле, 6	1734–1750	9,604	4028	590	1510	142	108	3226
Тигенгурин, 38	1623–1632	4,309	1750	16	1030	140	10	1363
Ассекифаф, 1	1167–1176	0,622	71	180	184	51	5	131
Ассекифаф, 1	1078–1088	0,807	99	202	279	551	5	171
Иссауане, 1	1465–1488	0,617	134	125	150	41	28	139
Тан-Батек, 1	1276–1284	0,658	113	41	298	16	3	187
Гара, 1	1995–2020	1,409	470	45	418	74	13	390
Зауатане, 1	1686–1698	0,913	193	10	427	20	7	256

На северо-восточном обрамлении Хоггара, в бассейне Мурзук, на поверхность выходят кембро-ордовикские песчаники и конгломераты. В районе города Гат на алжиро-ливийской границе минерализация воды в колодцах не превышает 0,3 г / л. Многочисленные родники, приуроченные к песчаникам девона и силура, имеют минерализацию воды до 0,8 г / л [3].

К западу от Хоггара располагается крупный бассейн Тауденни, сложенный отложениями верхнего протерозоя и палеозоя общей мощностью до 4000 м. Неглубоко залегающие отложения фундамента, кембрия, ордовика и силура содержат пресную или солоноватую воду. В районе Бандиагара (Мали) минерализация воды в колодцах и родниках, выходящих из трещиноватых песчаников кембрия и силура, имеет минерализацию от 0,01 до 0,4 г / л [3].

Аналогичная ситуация наблюдается на южном продолжении бассейна Серирин (бассейн Уллимеден на севере Нигера). Здесь кембро-ордовикские и девонские отложения содержат воду с минерализацией до 0,3 г / л. На юге минерализация воды в кембро-ордовикских отложениях повышается до 0,6 г / л, а в девонских отложениях до 21–28 г / л [16].

Низкая минерализация подземных вод большинством исследователей объясняется благоприятными условиями инфильтрации в водоносные горизонты, учитывая ливневый характер осадков и хорошую вертикальную проницаемость разреза. Кроме того, основной объем инфильтрационных вод мог образоваться в течение длительного влажного периода в плейстоцене. Определение возраста подземных вод по данным изотопных исследований дало цифру 12000 лет [22], что соответствует этому периоду.

И все же повсеместное распространение пресных вод на обширной территории и на большой глубине современной нельзя объяснить инфильтраци-

ей поверхностных вод. Гидрогеологические данные по кристаллическим массивам Северного полушария показывают, что пресные воды уже на глубине 200–300 м могут смениться рассолами. Так на восточном склоне Воронежского массива уже на глубине 200 м девонские воды имеют минерализацию 36–48 г / л, несмотря на гумидный климат территории и широкое распространение пресных пластовых вод на меньших глубинах [5].

Полученные данные заставляют предположить, что геологическая история Африканского континента была особенно благоприятна для накопления ресурсов пресных, а в ряде случаев и ультрапресных (минерализация менее 0,1 г / л), вод и их сохранности, несмотря на жесткие аридные условия региона. Эти условия были заложены еще в докембрийский период, когда отмечались следы существования ледников. Особое значение для накопления воды на континенте имело ордовикское оледенение в период 440–420 млн лет назад. В этот период районы Гондваны, находившиеся в южной полярной зоне, были покрыты мощными ледниковыми отложениями. Следы ледниковых отложений отмечаются почти на всей территории Северной Африки, Аравийском полуострове, в Южной Америке и Австралии [18, 21].

В бассейне Илизи флювиогляциальные отложения сформировали хорошо проницаемые пласты, к которым приурочены многочисленные месторождения нефти и газа. Протяженные долины (ущелья), заполненные турбидитными осадками на северном склоне Тассили-Аджера, были сформированы потоками тающей воды, которые достигали береговой зоны моря. Предполагается, что сам ледник достигал зоны континентального шельфа [15, 19]. Анализ строения этих долин позволяет предполагать, что они являлись проводниками огромных масс пресной воды, стекающей при таянии ледников по склонам кристаллического массива и опресняющей воду седиментационных бассейнов, прилегающих к Хоггару.

В этот период породы были хорошо промыты от легкорастворимых хлористых солей. В дальнейшем континентальное положение Хоггара и его высокое гипсометрическое положение обеспечили защиту от засоления грунтов на его территории водами морского генезиса.

История геологического развития Африканского континента оказалась особенно благоприятной для накопления и сохранения значительных запасов пресных подземных вод в древних кристаллических массивах, которые никогда не погружались ниже уровня моря. В конце протерозоя и в раннем палеозое Сахара находилась в южной полярной зоне и в это время на ее территории формировались мощные ледники. По разным оценкам объем льда и территория, покрытая ледниками, были соизмеримы или даже больше, чем объем и площадь ледового покрытия современной Антарктиды. К этому времени относится и значительное (на 70–90 м) снижение уровня океана. Такая корреляция событий свидетельствует о том, что объем поверхностной гидросферы мог быть меньше, чем в настоящее время, и процесс перехода морской воды в ледники мог привести к значительному повышению солености морской воды. Для седиментационных бассейнов Северного полушария как раз и характерен высокий уровень минерализации подземных вод палеозоя.

В позднем палеозое (каменноугольный период) южный полюс сместился в Южную Африку, и началось таяние ледников Сахары с заполнением полостей кристаллических пород и прилегающих бассейнов пресной водой. Трансгрессия палеозойских морей в северные районы Сахары не затронула высоко

приподнятые кристаллические массивы, где сохранились пресные воды. Современная инфильтрация метеорных вод происходит в породы, хорошо промытые в прошлые геологические периоды. Если такая концепция верна, то огромные ресурсы пресных вод кристаллических массивов и нижнепалеозойских отложений Сахары следует отнести к слабо восполняемым и статическим, что требует бережного к ним отношения.

Список литературы

1. Богданов А. А. О строении массива Хоггар (Туарегский массив) в Алжирской Сахаре / А. А. Богданов // Геотектоника. – 1971. – № 6. – С. 27–43.
2. Геология и нефтегазоносность Алжирской Сахары / М. М. Алиев, И. А. Лаусин, М. В. Корж и др. – Москва : Недра, 1971. – 328 с.
3. Гидрогеология Африки / науч. ред. Н. А. Маринов. – Москва : Недра, 1978. – 371 с.
4. Друэн Ж. Водные ресурсы Северо-Западной Африки / Ж. Друэн // Гидрогеология и гидрология аридной зоны земного шара. – Москва: Иностранная литература, 1955. – С. 7–71.
5. Кисельгоф С. М. Новые данные по гидрогеологии девонских отложений северо-западной части Волгоградской области / С. М. Кисельгоф // Вопросы геологии и нефтегазоносности Волгоградской области : тр. ВНИИНГ. – 1965. – Вып. 3. – С. 310–323.
6. Лот А. К другим Тассили. Новые открытия в Сахаре / А. Лот. – Ленинград : Искусство, 1984. – 215 с.
7. Морозов Л. И. Нефтегазоносность зон распространения инфильтрогенных вод / Л. И. Морозов. – Москва : Недра, 1989. – 151 с.
8. Пантелеев И. Я. Подземные воды Алжира / И. Я. Пантелеев, С. М. Голубев. – Москва : Недра, 1978. – 212 с.
9. Силин-Бекчурин А. И. Подземные воды Северной Африки / А. И. Силин-Бекчурин. – Москва : АН СССР, 1962. – 201 с.
10. Чайка В. М. Рифейские зеленокаменные пояса Северной Африки и их рудные месторождения / В. М. Чайка. – Москва : Наука, 1990. – 103 с.
11. Шубин М. А. Подземные воды Центральной и Юго-Западной Сахары / М. А. Шубин. – Волгоград : Принт, 2002. – 117 с.
12. Cornet A. Essais sur l'hydrogeologie du Grand Erg Occidentale et des regions limitrophes / A. Cornet // Les Foggaras. Trav. Inst. Rech. Sahar. – 1952. – Vol. 8. – P. 71–122.
13. Cornet A. L'eau dans le Tanezrouft / A. Cornet // Bull. Liaison sahar. – 1960. – Vol. XI, no. 38. – P. 198–200.
14. Cornet A. Introduction a l'hydrogeologie saharienne / A. Cornet // Revue de geogr. phys. et geol. dyn. – 1964. – Ser. 2, vol. VI. – P. 5–72.
15. Deschamps R. Architecture of Late Ordovician glacial valleys in the Tassili N'Ajjer area (Algeria) / R. Deschamps, R. Eschard, S. Roussé // Sedimentary Geology. – May 1, 2013. – Vol. 289. – P. 124–147.
16. Dodo A. Caractérisation des systemes aquifères transfrontalières du Niger (Managing shared aquifer resources in Africa) / A. Dodo. – USA : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2004. – P. 123–128.
17. Durozoy G. Hydrogeologie du Cambro-Ordovicien des Tassili Oua-N-Ahaggar (Sahara Sud-Oriental) / G. Durozoy // Publ. Serv. de la Carte Geol. de l'Algerie. Bull. – 1960. – Vol. 28. – P. 43–59.
18. Ghienne J.-F. The Late Ordovician glacial sedimentary system of the North Gondwana platform / J.-F. Ghienne, D. P. Heron, J. Moreau, M. Denis, M. // Glacial Sedimentary Processes and Products. Special Publication, International Association of Sedimentologists / Deynoux Hambrey, M. Christoffersen, P. Glasser, N. Janssen, P. Hubbard, B. and M. Siegert (eds.). – Blackwells, Oxford, 2007. – 295 p.
19. Hirst J. P. P. Tunnel valleys and density flow processes in the Upper Ordovician glacial succession / J. P. P. Hirst, A. Benbakir, D. F. Payne, I. Westlake // Journal of Petroleum Geology. – 2002. – Vol. 25, № 3. – P. 297–324.
20. 'Huge' water resource exists under Africa // BBC News. – Режим доступа: www.bbc.co.uk/news/science-environment-17775211, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
21. Moreau J. 440 Ma ice stream in North Africa / J. Moreau, J.-F. Ghienne, D. P. Heron, J.-L. Rubino, M. Deynoux // Geology. – September 2005. – Vol. 33, № 9. – P. 753–756.

22. Moulla A. S. Contribution des isotopes à l'étude des ressources en eau souterraines transfrontalières en Algérie (Managing shared aquifer resources in Africa) / A. S. Moulla, A. Guendouz, M. E. H. Cherchali. – USA : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2004. – P. 55–67.

23. Wright E. P. The hydrogeology of crystalline basement aquifer in Africa / E. P. Wright, W. G. Burgess (eds.) // Geological Society Special Publication. – 1992. – № 66. – P. 1–27.

References

1. Bogdanov A. A. O stroenii massiva Khoggar (Tuaregskiy massiv) v Alzhirskoy Sakhare [About the structure of the massif of the Hoggar (Tuareg) in the Algerian Sahara]. *Geotektonika* [Geotectonics], 1971, no. 6, pp. 27–43.

2. Aliev M. M., Lausen I. A., Korzh M. V., et al. *Geologiya i neftegazonosnost Alzhirskoy Sakhary* [Geology and oil and gas potential of the Algerian Sahara], Moscow, Nedra Publ., 1971. 328 p.

3. Marinov N. A. (ed.) *Gidrogeologiya Afriki* [Hydrogeology of Africa], Moscow, Nedra Publ., 1978. 371 p.

4. Druen Zh. Vodnye resursy Severo-Zapadnoy Afriki [Water resources of North-West Africa]. *Gidrogeologiya i gidrologiya aridnoy zony zemnogo shara* [Hydrogeology and hydrology of the arid zone of the globe], Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1955, pp. 7–71.

5. Kisel'gov S. M. Novye dannye po gidrogeologii devonskikh otlozheniy severo-zapadnoy chasti Volgogradskoy oblasti [New data on the hydrogeology of Devonian deposits of the North-Western part of Volgograd region]. *Voprosy geologii i neftegazonosnosti Volgogradskoy oblasti : tr. VNIING* [Geology and Petroleum Potential of the Volgograd Region. Proceedings of Vedeneyev All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering], 1965, vol. 3, pp. 310–323.

6. Lhote H. *To other Tassilis: New discoveries in Sahara. Art*, 1984. 215 p.

7. Morozov L. I. *Petroleum potential of zones with infiltrating waters*, Moscow, Nedra Publ., 1989. 151 p.

8. Pantelev I. Ya., Golubev S. M. *Groundwater in Algeria*, Moscow, Nedra Publ., 1978. 212 p.

9. Silin-Bekchurin A. I. *Underground waters of North Africa*, Moscow, USSR Academy of Sciences Publ. House, 1962. 201 p.

10. Chaika V. M. *Riphean Greenstone belts of North Africa and their ore deposit*, Moscow, Science Publ., 1990. 103 p.

11. Shubin M. A. *Underground water of Central and South-Western Sahara*, Volgograd, Print Publ., 2002. 117 p.

12. Cornet A. Essais sur l'hydrogéologie du Grand Erg Occidentale et des régions limitrophes. Les Foggaras. *Trav. Inst. Rech. Sahar.*, 1952, vol. 8, pp. 71–122.

13. Cornet A. L'eau dans le Tanezrouft. *Bull. Liaison sahar.*, 1960, vol. XI, no. 38, pp. 198–200.

14. Cornet A. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. *Revue de geogr. phys. et geol. dyn.*, 1964. ser. 2, vol. VI, pp. 5–72.

15. Deschamps R., Eschard R., Roussé S. Architecture of Late Ordovician glacial valleys in the Tassili N'Ajjer area (Algeria). *Sedimentary Geology*, May 1, 2013, vol. 289, pp. 124–147.

16. Dodo A. *Caractérisation des systèmes aquifères transfrontalières du Niger (Managing shared aquifer resources in Africa)*, USA, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Publ. House, 2004, pp. 123–128.

17. Durozoy G. Hydrogéologie du Cambro-Ordovicien des Tassili Oua-N-Ahaggar (Sahara Sud-Oriental). *Publ. Serv. de la Carte Geol. de l'Algérie. Bull.*, 1960, vol. 28, pp. 43–59.

18. Ghienne J.-F., Heron D.P., Moreau J., Denis M., Deynoux M. The Late Ordovician glacial sedimentary system of the North Gondwana platform. *Glacial Sedimentary Processes and Products. Special Publication, International Association of Sedimentologists*, Blackwells, Oxford, 200. 295 p.

19. Hirst J. P. P., Benbakir A., Payne D. F., Westlake I. Tunnel valleys and density flow processes in the Upper Ordovician glacial succession. *Journal of Petroleum Geology*, 2002, vol. 25, no. 3, pp. 297–324.

20. 'Huge' water resource exists under Africa. *BBC News*. Available at: www.bbc.co.uk/news/science-environment-17775211.

21. Moreau J., Ghienne J.-F., Heron D. P., Rubino J.-L., Deynoux M. 440 Ma ice stream in North Africa. *Geology*, September 2005, vol. 33, no. 9, pp. 753–756.

22. Moulla A. S., Guendouz A., Cherchali M. E. H. *Contribution des isotopes à l'étude des ressources en eau souterraines transfrontalières en Algérie (Managing shared aquifer resources in Africa)*, USA, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Publ. House, 2004, pp. 55–67.

23. Wright E. P., Burgess W. G. (eds.) The hydrogeology of crystalline basement aquifer in Africa. *Geological Society Special Publication*, 1992, no. 66, pp. 1–27.