

ГИДРОГЕОЛОГИЯ

(ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ)

ГЕНЕЗИС ПРИРОДНЫХ ВОД В ПРОЦЕССЕ КРУПНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Анисимов Леонид Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Волгоградский государственный университет, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 100, e-mail: l_anisimov@yahoo.com

Донцова Ольга Леонидовна, кандидат географических наук, доцент, Кубанский государственный университет, Российская Федерация, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: doncovaol@mail.ru

Панина Ольга Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Кубанский государственный университет, Российская Федерация, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: panina_olga@inbox.ru

Предложены гипотезы, которые отражают ведущую роль геологических изменений при формировании химического состава вод седиментационных бассейнов в течение фанерозоя. Высокая минерализация вод палеозойских бассейнов северного полушария объясняется концентрированием солей в периоды глобальных оледенений. Мелководность морей и отрицательные температуры на большей части земного шара приводили к тому, что большая часть воды выводилась в лед, а оставшаяся вода (криопег) захоронялась в осадках. Высококонцентрированные рассолы явились основой для масштабного палеозойского галогенеза при переходе к теплому ариднему климату и этим можно объяснить огромные толщи соленосных толщ палеозоя. Другая ситуация возникла в континентальных кристаллических массивах, которые никогда не погружались ниже уровня моря. В конце протерозоя и в раннем палеозое Африканский континент находился в южной полярной зоне и в это время на его территории формировались мощные ледники. В позднем палеозое началось таяние ледников с заполнением полостей кристаллических пород и прилегающих бассейнов пресной водой. Трансгрессия палеозойских морей не затронула высоко приподнятые кристаллические массивы, где сохранились пресные воды.

Ключевые слова: генезис вод, минерализация вод, седиментационный бассейн, глобальное оледенение, криопеги, континентальный кристаллический массив, соленосные толщи

GENESIS OF NATURAL WATERS IN THE PROCESS OF MAJOR GEOLOGICAL CHANGES IN THE HISTORY OF THE EARTH

Anisimov Leonid A., D. Sc. of Geology and Mineralogy, Professor, Volgograd State University, 100 Universitetskiy Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation, e-mail: l_anisimov@yahoo.com

Dontsova Olga, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Kuban State University, 149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russian Federation, e-mail: doncovaol@mail.ru

Panina Olga, Ph. D. of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Kuban State University, 149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russian Federation, e-mail: panina_olga@inbox.ru

Hypotheses that reflect the leading role of geologic change in the formation of the chemical composition of sedimentation basins during the Phanerozoic are proposed. The high salinity of the waters of the Paleozoic basins of the Northern hemisphere is explained by the concentration of salts during the periods of global glaciation. The shallow seas and negative temperatures in most of the world led to the fact that most of the water was withdrawn into the ice, and the remaining water (cryopeg) was buried in precipitation. High salinity brines were the basis for large-scale Paleozoic halogenesis during the transition to a warm arid climate and this situation can be explained by the huge

thickness of many salt-bearing strata of the Paleozoic. Another situation arose in continental crystal massifs that never sank below sea level. At the end of the Proterozoic and early Paleozoic the African continent was located in the southern polar zone and at this time, powerful glaciers formed on its territory. In the late Paleozoic, glaciers began to melt, filling the cavities of crystalline rocks and adjacent sedimentary basins with fresh water. The transgression of the Paleozoic seas did not affect the highly elevated crystalline massifs where fresh water was preserved.

Keywords: the Genesis of the waters, mineralization, sedimentation basin, global glaciation, Kriopigi, continental crystalline array saliferous strata

Введение. Условия формирования высококонцентрированных рассолов многих седиментационных бассейнов продолжает оставаться дискуссионной проблемой с весьма различными точками зрения на причины концентрирования солей. Известный американский гидрогеохимик Джеффри Ханор в ряде статей описал 50-летнюю историю взглядов на процессы формирования химического состава подземных вод [24]. После заявления В. Рассела в 1933 г., что «этот вопрос предполагает благоприятные возможности для дальнейших исследований», через 50 лет в 1983 г. Д. Ханор отмечает, что до сих пор остаются две особенно интригующие проблемы:

1. Почему воды имеют такую высокую соленость, особенно в бассейнах, где отсутствуют эвапориты.
2. Почему соотношение главных ионов не соответствует составу известных поверхностных морских вод и рассолов.

Эволюция химического состава поверхностных вод во многом определяет последующую историю подземных вод. Этот вопрос является предметом принципиальных споров. Большое влияние на дискуссию оказали взгляды и авторитет В. И. Вернадского, который придерживался мнения о постоянстве состава вод Мирового океана. Он полагал, что с самых древних этапов геологической истории (с архея) не только состав и формы нахождения элементов должны быть аналогичны современным, но и объем вод на земной поверхности. За прошедшие 100 лет многое изменилось, прежде всего, стали известны гидрохимические разрезы многих седиментационных бассейнов от поверхности до фундамента. Новые данные вносят в прежние представления соответствующие коррективы.

Региональная гидрогеология и геохимия всегда ставили вопрос о происхождении подземных вод и решали его прежде всего на основе их химического состава. Сравнение химического состава «седиментационных вод» различных бассейнов позволяет говорить о своеобразной геохимической специализации этих бассейнов. В этом смысле гидрогеохимические провинции формируются в результате синтеза геологических, географических и климатических факторов, которые изменяются во времени. Новые данные о характере процессов дегазации Земли, изменение объема поверхностной гидросферы и уровня океана свидетельствуют о весьма масштабных изменениях процессов выноса химических элементов, их разбавления природными водами и разную степень промытости осадочной толщи в различные периоды геологической истории.

Относительная независимость химии подземных вод от состава терригенных и карбонатных пород создает значительные трудности для сопоставления геологической истории седиментационного бассейна и залегающих в нем подземных вод, а значит и для понимания процессов их формирования. Поэтому вопрос о концентрации ионов в воде древних морских бассейнов пытаются решить, привлекая геохимические данные о составе эвапоритовых отложений и флюидных включений. Например, результаты исследований, проведенных как российскими, так и зарубежными исследователями, однозначно доказали снижение величин Ca/Mg в течение мезозоя и кайнозоя [19; 29; 33]. Свидетельства эволюции химического состава Мирового океана, основанные на характерных типах подземных вод различных седиментационных бассейнов в наиболее категоричной форме, принимал Е. В. Посохов [11]. В течение фанерозоя имела место смена хлоркальциевого химического типа, характерного для палеозоя, на сульфатный, к которому принадлежит и вода современных океанов.

Более драматичная концепция касается изменения концентраций хлора с течением геологического времени, которая основывается на большом объеме ископаемых солей, которые были выведены из морской воды в течение фанерозоя. Н. М. Страхов [12] рассматривал процесс галогенеза как «огромную опреснительную установку». На этом основании он полагал, что «соленость океанов на историческом этапе не могла оставаться постоянной, но то уменьшалась, когда галогенез был особенно мощным, то возрастала, когда галогенез временно ослабевал». По некоторым оценкам соленость воды океана в раннем палеозое должна быть значительно выше, чем в современной морской воде. А. Л. Яншин [15] писал, что даже в фанерозойское время состав вод океана подвергался существенным изменениям в отношении общей солёности и состава растворенных солей. О существенном превышении солёности вод древних бассейнов по сравнению с солёностью современной морской воды свидетельствуют огромные размеры многих солеродных бассейнов, длительность соле-накопления и возможная глубоководность бассейнов, где осаждение хлоридов при нормальной солёности морской воды практически невозможно.

Палеотипные, мезотипные и кайнотипные подземные воды. Сравнение химического состава подземных вод седиментационных бассейнов различного возраста показывает достаточно определенные тенденции в изменении солёности вод, а именно, уменьшение их солёности. В раннем палеозое в ряде бассейнов северного полушария распространены воды особо высокой минерализации, обычно более 300 г/л. Их параметры приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Палеотипные воды. Параметры раннего палеозоя

Бассейн	Глубина, м	Минерализация, г/л	Ca, г/л	Mg, г/л	Возраст соленосных пород в разрезе
Уиллистон, Канада	2800	325	34	2	Силур
Хасси Мессауд, Алжир	3400	340	40	8	Триас
Балтийский бассейн, Россия	2500	200	40	4,9	Пермь
Восточная Сибирь,	3400	350	42	13	Кембрий
Восточная Сибирь, кимберлитовая трубка	600	358	74	12,5	Кембрий

Для вод характерен существенно хлоркальциевый состав, содержание кальция достигает 40–70 г/л. Несколько пониженная минерализация вод Балтийского бассейна (до 200 г/л) сочетается с высоким содержанием кальция, причем отсутствует прямой контакт с соленосными отложениями. Между терригенными отложениями кембрия и пермскими эвапоритами залегает 700-метровая толща силурийских глин, которая надежно изолирует эти отложения друг от друга.

Воды **позднего палеозоя** (девон-пермь) имеют несколько пониженную минерализацию, для Волго-Уральской области это 200–270 г/л. и более низкую концентрацию кальция (табл. 2). С учетом этих соображений был проведен анализ гидрохимических разрезов различных районов Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты с выделением зоны «седиментационных вод» [2]. На основе изменения их химического состава во времени были установлены закономерности эволюции вод в течение палеозоя и мезозоя, что хорошо увязывается с масштабными процессами карбонатообразования и галогенеза в эти периоды. Так снижение концентрации Са в течение девонского и каменноугольного периодов хорошо коррелируется с масштабным карбонатообразованием, что должно привести к выводу из морской воды кальция. Пермский галогенез определил вывод из поверхностной гидросферы хлористых солей и, следовательно, снижение солёности мезозойских бассейнов.

Таблица 2

Палеотипные воды. Параметры вод позднего палеозоя

Бассейн, возраст отложений	Глубина, м	Минерализация, г/л	Ca, г/л	Mg, г/л	Возраст соленосных пород в разрезе
Уиллистон, Канада, D ₁	2500	320	24	2,3	Силур
Тимано-Печора, Россия, D ₂	4500	190	15	1,2	—
Волго-Урал, Россия, D ₂	1700	274	21	3,8	Пермь
Волго-Урал, Россия, C ₁	1700	257	18	3,6	Пермь
Днепровско-Донецкая впадина, Украина, C ₁	4200	260	36	1,2	Пермь

В мезозойских отложениях наблюдается значительное снижение минерализации вод. В глобальном плане снижение концентраций хлора в подземных водах коррелируется с масштабным палеозойским галогенезом. Ряд авторов предполагает значительный рост объема воды в гидросфере. Характерные анализы вод мезозойских отложений приводятся в таблице 3.

Таблица 3

Мезотипные воды. Характерные параметры вод мезозойских бассейнов

Бассейн, возраст отложений	Глубина, м	Минерализация, г/л	Ca, г/л	Mg, г/л	Возраст соленосных пород в разрезе
Северное море, J ₂	2800	30	0,8	0,14	Пермь
Западная Сибирь, J ₂	2800	28	1,0	0,2	—
Западная Сибирь, K ₁	2400	24	0,6	0,1	—
Северный Кавказ, J ₂	3200	100	4,6	0,6	Верхняя юра
Северный Кавказ, K ₁	2800	100	3,4	0,6	Верхняя юра

На огромной территории Западно-Сибирского мегабассейна распространен достаточно однотипный комплекс подземных вод. Несмотря на существование гидрохимической зональности, хорошо описанной В. М. Матусевичем [9], общий облик вод ниже региональной покрывки турон-олигоценного возраста характеризуется скорее, как однообразный с характерной минерализацией 15–25 г/л с отдельными аномалиями и колебанием минерализации в пределах 10–30 мг/л.

Для всего района характерно сходство средних значений минерализации (15–20 г/л) и, в то же время широкие вариации значений минерализации по всем рассматриваемым площадям. Все это говорит о разнообразии процессов, влияющих на формирование химического состава подземных вод в каждом районе и в то же время об одинаковом наборе этих процессов для каждого района.

Нижний этаж Западно-Сибирского бассейна объединяет водоносные комплексы отложений мелового и юрского возраста, с которыми связаны крупнейшие запасы нефти и газа и приповерхностной части фундамента. От периферии к центру бассейна в связи с погружением и увеличением глинистости осадков происходит общее ухудшение условий водообмена и увеличение минерализации подземных вод. Во внутренней части бассейна подземные воды нижнего этажа залегают на глубинах более 1 000 м. Минерализация подземных вод достигает 20–30 г/л. Такое строение бассейна привело к формированию взглядов о преимущественно седиментационном происхождении подземных вод [7].

Согласно этой модели, во всей центральной части бассейна развиты отжатые поровые воды, представляющие собой измененные воды древних морских бассейнов. На элизионных этапах в результате уплотнения осадков вместе с элизионными водами в коллектор поступают и углеводороды. Чем интенсивнее элизионный водообмен, тем большее количество углеводородов участвует в процессах нефтеобразования. Исторически сложилось, что такое мнение являлось преобладающим и при рассмот-

рении гидрогеологических вопросов в основном рассматривались процессы седиментационного водообмена и инфильтрации.

Для кайнозойских бассейнов характерны значительные колебания минерализации подземных вод, что отражает резкое изменение гидрологического режима бассейнов, имеющих в большинстве случаев ограниченные размеры. На это обстоятельство указывал Н. М. Страхов, когда писал о малых размерах и рассредоточенности внутриконтинентальных и краевых морских бассейнов, где узлы соленакопления теряют свою четкую выраженность, как бы «размазываются».

Как правило, воды кайнозойских отложений окраинных морей имеют соленость близкую к океанской (35 г/л), хотя в изолированных бассейнах соленость подземных вод может меняться в больших пределах (табл. 4).

Общая тенденция снижения минерализации подземных вод в зависимости от возраста отложений вполне очевидна, что требует объяснений, прежде всего, с позиций эволюции литосферы, гидросферы и атмосферы. Рассмотрим, в какой степени эти тенденции согласуются с современными представлениями об этих процессах.

Таблица 4

Кайнотипные воды. Гидрохимические параметры

Бассейн, возраст отложений	Глубина, м	Минерализация, г/л	Ca, г/л	Mg, г/л	Возраст соленосных пород в разрезе
Галф Кост, США, N	—	15–150	0–5	0–1,2	U. Jurassic
Галф Кост, США, Pg	3500	14–27	0,06–0,24	0,03	U. Jurassic
Северный Кавказ, Россия, Pg	750	32	0,5	0,2	U. Jurassic
Северный Кавказ, поровые воды глин, N1	300–900	15–30	0,6–2,0	0,4–1,2	U. Jurassic
Южный Каспий, Азербайджан, N2	1700	10–160	0,2–6,0	0–5,0	—
Сахалин, N	1300	16	0,6	0,03	—

Эволюция гидросферы и седиментационных бассейнов. Историю подземной воды можно было бы начать с началом осадконакопления в седиментационном бассейне. Содержание ионов хлора в связанной подземной воде должно отражать соленость бассейна седиментации. В современных крупных водоемах вода имеет обычно постоянный состав. Однако, если современные моря с большой массой воды могут нивелировать явления опреснения при континентальном стоке и, тем более, процессы разгрузки подземных вод в водоемы, то в древних мелководных эпиконтинентальных морях эти процессы должны были отразиться на составе поверхностных вод в различных частях бассейна. Небольшая глубина водоемов в сочетании с огромной площадью седиментационных бассейнов делает эти бассейны особенно чувствительными к воздействию как поверхностных вод рек, так и разгружающихся подземных вод. Разломы и рифтовые системы в консолидированной континентальной коре являлись проводниками поверхностных вод на большие глубины, где в условиях высоких температур происходили фазовые переходы с образованием водяного пара и остаточных концентрированных рассолов. В зависимости от солености трансгрессирующих морских вод в толщу пород в рифтовых зонах проникают воды различной минерализации, а в условиях гидротермальной деятельности дифференциация солей в водных системах протекает еще более активно. Именно такими процессами объясняется различия в минерализации гидротермальных рассолов в районах срединных океанических хребтов.

П. П. Тимофеев и В. Н. Холодов [13] показали, что в палеозойских разрезах отсутствуют ассоциации пород, аналогичные тем осадкам, которые ныне характерны для абиссальных областей современных океанов. Можно согласиться с мнением о том, что палеозойские океаны, а тем более океаны докембрия были, вероятно, мало

похожи на современные. Указанные авторы подчеркивают, что со времен протерозоя и до четвертичного периода развитие преобладающих конечных водоемов стока происходило по линии: мелководные морские озероподобные водоемы – эпиконтинентальные моря – эпиконтинентальные краевые моря и океаны. Аналогичные закономерности подметили Эмери и Мейер [21], показавшие распространение различных типов седиментационных бассейнов за геологическую историю.

Ведущим фактором на первых этапах эволюции гидросферы многие геохимики считают дегазацию вещества мантии. В связи с этим процессом предполагается рост объема гидросферы (рис.1).

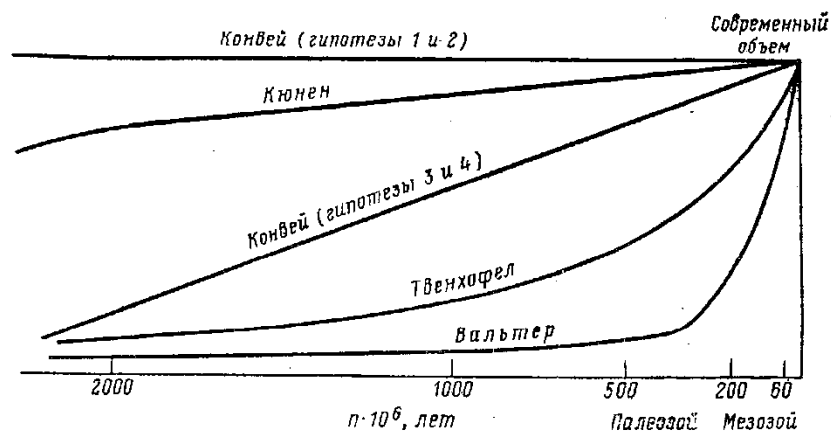


Рис. 1. Существующие представления о темпах увеличения объема гидросферы. Вариации количества океанической воды в течение геологического времени согласно воззрениям Вальтера, Твенхофела, Кюннена и Конвея [10]

Помимо неравномерности дегазации мантии, объем и уровень океана может изменяться по следующим причинам.

1. Перераспределение массы гидросферы, в результате материковых оледенений.

В настоящее время объем материковых льдов не превышает 3–4% от объема жидкой воды. В прошлые периоды были другие соотношения твердой и жидкой фаз. Еще в докембрийский период отмечались следы существования ледников на огромных территориях, захватывая низкие широты. Учитывая такую площадь оледенения и меньший объем океана по сравнению с современным, можно говорить о сопоставимых объемах жидкой воды и льда в течении этого периода, значит, и значительное повышение солености вод седиментационных бассейнов.

2. Изменение уровня в результате изменения емкости океанических впадин. Этот процесс обусловлен геотектоническим развитием Земли, в зависимости от которого увеличивалась емкость впадин с заполнением их не только водой, но и сносимым с континентов материалом. Тут мы вступаем в область конкурирующих концепций, объясняющих образование океанов и их эволюцию. Этот вопрос требует специального рассмотрения.

Роль оледенений в формировании состава вод седиментационных бассейнов.

Высокую минерализацию подземных вод морского генезиса обычно связывают с повышением солености вод седиментационных бассейнов в результате солнечного испарения. В тоже время ряд исследователей не исключает рост концентрации солей в древних водоемах при замерзании воды, когда при понижении температуры количество незамерзшей воды уменьшается, а концентрация солей в ней возрастает [16; 17; 23; 32]. Таким процессом, как следствием новейшего оледенения в северном полушарии объясняется широкое распространение рассолов в породах Канадского и Скандинавского кристаллических массивов. Ниже зоны льдистых горных пород образуется зона криопэггов [14]. Их минерализация и химический состав зависят от

температуры на фронте промерзания, откуда наблюдается гравитационный отток крепких рассолов. Эти рассолы охлаждают нижележащие водоносные горизонты гидрогеологических структур на глубину более 1–1,5 км. Аналогичные процессы гравитационного оттока крепких рассолов (до 400 г/л) объясняют, например, глубокое охлаждение земной коры в Далдыно-Алакитском районе Якутии [1].

Формирование кристаллов льда в соленой воде начинается при отрицательной эвтектической температуре, соответствующей концентрации растворенных веществ. Рост кристаллов льда сопровождается вытеснением солей в маточный раствор, при этом температура кристаллизации понижается. Постепенно ледяные кристаллы окружают рассол, образуются ячейки незамерзшей воды, которая обогащается солями все больше и больше. Часть солей кристаллизуется, а часть переходит под образующийся ледяной покров. Таким образом, лед на ранней стадии формирования представляет собой смесь пресных ледяных кристаллов, ячеек с рассолом и агрегатов солей. В дальнейшем под действием гравитации, колебаний температуры и давления ячейки с рассолом постепенно опускаются вниз. Если же промерзание водной массы происходит быстро, то соленость льда близка к солености исходной воды. Если теплоотдача в окружающую среду идет медленно, то почти весь рассол уходит в подледное пространство, а соленость льда приближается к нулю.

При высокой концентрации солей температура замерзания рассолов намного ниже нулевой отметки. Так она составляет минус 23 °С для насыщенного рассола хлористого натрия и минус 55 °С для насыщенного раствора хлористого кальция. При инфильтрации таких рассолов в горные породы их промерзание может достигать значительной глубины. Для морских вод с нормальной соленостью можно наблюдать зимой под антарктическим льдом формирование ледяных сталактитов. Эти полые трубки льда вырастают из ледяной поверхности, как сосульки. Процесс начинается подо льдом, где соленая морская вода замерзает, а соль, для которой не нашлось места в кристаллической структуре льда, выделяется, еще больше увеличивая соленость заключенной в его пустотах воды – и снижая температуру её замерзания. Если лед даст трещину – этот концентрированный раствор потечет вниз, так как его плотность выше, чем у окружающей морской воды. А поскольку его температура ниже точки замерзания воды нормальной морской солености – вокруг образуется ледяная «труба» [22].

При криогенных процессах происходят не только фазовые переходы подземных вод, но и сложные физико-химические преобразования горных растворов, а также минерального скелета водовмещающих горных пород. При промерзании гидрогеологических структур их исходная гидрохимическая зональность изменяется. В верхней части гидрогеологического разреза (300–400 м) формируется зона пресных льдов, обогащенных низкомagneзиальным кальцитом, гипсом, мирабилитом, содой, другими сульфатными солями и криогалитом, при этом соли по разрезу распределяются как в хроматографической колонке сверху вниз. Неравномерность охлаждения гидрогеологических структур за счет гравитационного оттока отрицательно-температурных рассолов по наиболее проницаемым зонам приводит к формированию линз межмерзлотных вод с избыточным криогенным напором и минерализацией до 150–180 г/л.

Однако, сводить особенности формирования гидрохимической зональности только к современному оледенению нет оснований. В настоящее время многочисленными исследованиями установлено, что с начала протерозоя Земля неоднократно переживала глобальные похолодания, приводящие к глубокому промерзанию верхних горизонтов литосферы и развитию покровных оледенений. Основным доказательством существования на Земле холодного климата в докайнозойское время являются следы древних покровных оледенений – тиллиты и экзарационные формы рельефа. Тиллиты – древние ледниковые несортированные отложения (морены), подвергшиеся уплотнению, иногда метаморфизму. Экзарация – эродирующее действие движущегося льда на горные породы. На основе определения абсолютного возраста тиллитов выделяются следующие криогенные эры [5; 8]: раннепротерозойская (2,5–2,0 млрд л.н.), позднепротерозойская (900–630 млн л.н.), палеозойская (460–230 млн л.н.)

и кайнозойская (25 млн л.н. – наше время). В пределах ледниковых эр выделяются криогенные периоды.

Во время максимумов эти оледенения охватывали большие территории на четырех-пяти континентах, распространяясь, порой до широты 40–30° и, возможно, более низких. Наибольшей популярностью пользуется гипотеза позднедокембрийского глобального оледенения, известная под именем гипотезы «snowball Earth», т. е. «Земля-снежок» [26; 28]. Согласно этой гипотезе Земля в позднем рифее и раннем венде неоднократно подверглась мощным оледенениям, простиравшимся от полюса до полюса, включая океаны, и продолжавшимся несколько миллионов лет.

Для фанерозоя особое значение для накопления воды в твердой фазе 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.

Последствия этих оледенений для состава вод седиментационных бассейнов определяются переходом значительного объема воды в лед, а в эвтоническом растворе концентрация солей могла достигать больших значений. Такая ситуация могла возникать при условии мелководности бассейна и длительности экстремально низких температур, что обеспечивало глубокое промерзание вод и небольшой объем оставшегося рассола. В целом глобальные оледенения вели к тому, что оставшаяся жидкая фаза могла иметь особо высокую минерализацию и дать основу для формирования подземных вод палеозоя ряда седиментационных бассейнов.

Кристаллические массивы древних континентов в криогенные эпохи. 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 [3].

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, главному кристаллическому массиву в Центральной Сахаре, для пород различного возраста позволяет оценить особенности компонентного состава подземных вод. Почти все пробы воды кембро-ордовикских и русловых отложений представлены пресными водами, в основном гидрокарбонатно-натриевого типа.

Данные о минерализации и химическом составе вод в осадочных породах в бассейнах, примыкающих к Хоггару, показывают, в основном, их идентичность с водами кристаллического массива.

На северо-восточном обрамлении Хоггара – в бассейне Мурзук – на поверхность выходят кембро-ордовикские песчаники и конгломераты. В районе г. 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 [4].

К западу от Хоггара располагается крупный бассейн Тауденни, сложенный отложениями верхнего протерозоя и палеозоя общей мощностью до 4 000 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 [4].

Аналогичная ситуация наблюдается на южном продолжении бассейна Серири 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 [20].

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.

В то же время следует учесть тот факт, что наименее минерализованные воды на Африканском континенте приурочены именно к кембрийским отложениям. Их минерализация часто ниже 0,5 г/л. Это характерно не только для Центральной Сахары, но и для Аравийского полуострова. На севере Саудовской Аравии наименее минерализованные воды (0,3–1,0 г/л) отмечены именно в кембрийских отложениях. Их условия залегания и химический состав описаны для района Сак на границе с Иорданией (Saq aquifer) [31].

Все эти факты говорят, что современной инфильтрацией поверхностных вод нельзя объяснить повсеместное распространение пресных вод на обширной территории и на большой глубине. 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.

Эти 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 [30]. 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.

В бассейне Илизи, примыкающем с севера к Хоггару, флювиогляциальные отложения сформировали хорошо проницаемые пласты, к которым приурочены многочисленные месторождения нефти и газа. Протяженные долины (ущелья), заполненные турбидитными осадками на северном склоне Тассили-Аджер, были сформированы потоками тающей воды, которые достигали береговой зоны моря. Предполагается, что сам ледник достигал зоны континентального шельфа [18; 25]. Анализ строения этих долин позволяет полагать, что они являлись проводниками огромных масс пресной воды, стекающей при таянии ледников по склонам кристаллического массива и опресняющей воду седиментационных бассейнов, прилегающих к Хоггару.

По бассейну Илизи, седиментационному бассейну, примыкающему к Хоггару с севера, многочисленными анализами подтверждается распространение пресных и солоноватых вод в пласте F6 нижнего девона на глубинах более 2 000 м на большой территории [3]. В этот период породы были хорошо промыты от легкорастворимых хлористых солей, а в дальнейшем континентальное положение Хоггара и его высокое гипсометрическое положение обеспечило защиту от засоления грунтов на его территории от вод морского генезиса.

Заключение. Предложенные гипотезы отражают ведущую роль климатических изменений при формировании химического состава вод седиментационных бассейнов. В периоды глобальных оледенений значительная масса воды переходит в лед, ледники охватывают континенты, а толщина льда в мелководных морях также определяет степень повышения солености вод бассейна. При таянии ледников концентрированные рассолы с высокой плотностью могут сохраняться в придонных частях бассейнов, определяя соленость иловых вод. Высокая минерализация вод палеозойских бассейнов северного полушария по нашим представлениям объясняется концентрированием

солей в периоды глобальных оледенений. Мелководность морей и отрицательные температуры на большей части земного шара приводили к тому, что большая часть воды выводилась в лед, а оставшаяся жидкая вода (криопег) захоронялась в осадках.

Другая ситуация возникла в континентальных массивах, которые никогда не погружались ниже уровня моря. Здесь создались особенно благоприятные условия для накопления и сохранения значительных запасов пресных подземных вод. 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.

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 хорошо промытые в прошлом геологические периоды.

Высококонцентрированные рассолы явились основой для масштабного палеозойского галогенеза при переходе к теплomu аридному климату. При солёности 200–250 г/л галогенез мог реализовываться даже в глубоких водоемах, в то время как в современных условиях (при солёности 35 г/л) он в таких масштабах практически невозможен. Именно высокой минерализацией исходной морской воды можно объяснить огромные толщи многих солёносных толщ палеозоя. Согласно Н. М. Страхову галогенез работал как мощная опреснительная установка, обеспечив значительное снижение минерализации вод во многих седиментационных бассейнах. Предложенную гипотезу следует рассматривать как попытку объяснить высокую минерализацию вод древних седиментационных бассейнов и постепенное снижение солёности вод в результате вывода солей из гидросферы при галогенезе и общего роста ее объема в течение геологического времени.

Список литературы

1. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, солёных вод и рассолов криоартезианских бассейнов северо-востока Сибирской платформы. Геология и геофизика, Т.59, №2, 2018, С.183-197
2. Анисимов Л.А. Сравнительная гидрогеология Волго-Уральской области и Западно-Сибирского мегабассейна. Фундаментальные и прикладные вопросы гидрогеологии нефтегазовых бассейнов. Труды ИПГН РАН. Материалы III Всероссийской конференции (с международным участием), посвященной 90-летию А.А. Карцева. Вып.1 М. ГЕОС, 2015. С.22-26
3. Анисимов Л.А., Шубин М.А. Формирование ресурсов пресных подземных вод Сахары. Геология, география, глобальная энергия, №3 (70) 2018, С.18-30
4. Гидрогеология Африки. Науч. ред. Н.А. Маринов. – М.: Недра, 1978, 371 с.
5. Ершов Э.Д. Общая геохронология. М. Изд. МГУ, 2002, 682 с.
6. Жарков М.А. Палеозойские солёносные формации мира. М.: Недра, 1974. 390 с.
7. Карцев А.А., Вагин С.Б., Матусевич В.М. Гидрогеология нефтегазовых бассейнов. М.: Недра, 1986. 244 с.
8. Климат в эпохи крупных биосферных перестроек. Тр. ГИН РАН; Вып. 550) Главные редакторы: М.А. Семихатов, Н.М. Чумаков. – М.: Наука. 2004. - 299 с
9. Матусевич В.М. Геохимия подземных вод Западно-Сибирского мегабассейна. М.: Недра, 1976. 158 с.
10. Мейсон Б. Основы геохимии М. Недра, 1971, 312 с.
11. Посохов Е.В. Химическая эволюция гидросферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 286 с.
12. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Т.1. М. Изд. АН СССР, 211 с.
13. Тимофеев П.П., Холодов В.Н. Эволюция бассейнов седиментации в истории Земли. Изв. АН СССР, серия геол. №7, 1984 С. 10-31
14. Толстихин Н.И. Криосфера и криопэги. Известия ВУЗов. Геология и разведка.1982, № 3, С. 115-117
15. Яншин А.Л. Основные проблемы солёнакопления. Проблемы солёнакопления. т.1, Новосибирск, 1977, С.5-15

16. Bein, A. and A. Arad. 1992. Formation of saline groundwaters in the Baltic region through freezing of sea water during glacial periods. *Journal of Hydrology*. 140, pp. 75-87
17. Bottomley D. J., Katz A., Chan L. H., et al. The origin and evolution of Canadian Shield brines: evaporation or freezing of sea water? New lithium isotope and geochemical evidence from the Slave Craton. - *Chem. Geol.* - 1999. - № 155. - pp. 295-320
18. Deschamps R., Eschard R., Roussé S. Architecture of Late Ordovician glacial valleys in the Tassili N'Ajjer area (Algeria). *Sedimentary Geology*, Volume 289, 1 May 2013, pp. 124-147
19. Coggon R., Teagle D., Svith-Duque C., Alt J., Cooper M. Reconstruction past sea water Mg/Ca and Sr/Ca from Mid-Ocean Ridge flank calcium carbonate veins. *Science*, 26 February 2010, Vol. 327, no 5969, pp. 1114-1117
20. Dodo A. Caractérisation des systemes aquifères transfrontalières du Niger. Managing shared aquifer resources in Africa. Published in 2004 by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Composed by Marina Rubio, 93200 Saint-Denis © UNESCO 2004, pp.123-128
21. Emery, D. & Myers, K. (eds.) *Sequence Stratigraphy*. 1996 304 pp.
22. Gosink J.F., Baker G.C. Salt fingering in subsea permafrost: some stability and energy consideration // *Journal Geophys. Research*. 1990. Vol. 95, N 6. pp.9575-9583
23. Herut B., Starinsky A., Katz A. et al. The role of seawater freezing in the formation of sub-surface brines // *Geochim. Cosmochim. Acta*. - 1990. - № 54. - pp. 13-21.
24. Hanor, J. S. (1983) Fifty years of thought on the origin and evolution of subsurface sedimentary brines: in Boardman, S.B. (Editor), *Revolution in the Earth Sciences: Advances in past half century*: Kendall/Hunt, Dubuque, pp.99-111.
25. Hirst J. P. P, Benbakir A, Payne D. F., Westlake I. (2002) Tunnel valleys, and density flow processes in the Upper Ordovician glacial succession, Illizi Basin, Algeria: Influence on reservoir quality. *Journal of Petroleum Geology* 25:3 pp.297-324
26. Hoffman, P.F. & Schrag, D.P., 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova* 14, pp. 129-155.
27. Horita J., Zimmermann H., and Holland H. Chemical evolution of sea water during Phanerozoic: Implication from the record of marine evaporates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 66, 2002, pp. 3733-3756
28. Kirschvink, J.L., Gaidos, E.J., Bertani, L.E., Beukes, N.J., Gutsmer, J., Maepa, L.N. & Steinberger, R.E., 2000. Paleoproterozoic snowball Earth: extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97, pp. 1400-1405.
29. Lowenstein T.K., Timofeeff M.N., Brennan S.T., Hardie L.A., and Demicco R.V. (2001) Oscillations in Phanerozoic Seawater Chemistry: Evidence from Fluid Inclusions. *SCIENCE*, v. 294, pp. 1086-1088.
30. Moreau J., Ghienne J.-F., Heron D.P., Rubino J.-L., Deynoux M. 440 Ma ice stream in North Africa. *Geology*, September 2005; v. 33; no. 9; pp. 753-756
31. Sharaf M.A. & Hussein M.T. Groundwater quality in the Saq aquifer, Saudi Arabia. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrogeologiques*, 41 (5) October 1995, pp.683-696
32. Starinsky, A. and A. Katz. 2003. The formation of natural cryogenic brines. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(8), pp. 1475-1484.
33. Tyrrell T. and Zeebe R. History of carbonate ion concentration over the last 100 million years. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 68, No. 17, pp. 3521-3530

References

1. Alekseeva L. P., Alekseev S. V. Geochemistry of underground ice, salt water and brines of cryoartesian basins of the North-East of the Siberian platform. *Geology and Geophysics*, Vol. 59, No. 2, 2018, Pp. 183-197
2. Anisimov L. A. Comparative hydrogeology of the Volga-Ural region and the West Siberian megabasin. Fundamental and applied issues of hydrogeology of oil and gas basins. *Proceedings of IPGN RAS. Materials of the III all-Russian conference (with international participation) dedicated to the 90th anniversary of A. A. Kartsev*. Issue 1 M. GEOS, 2015. Pp. 22-26
3. Anisimov L. A., Shubin M. A. Formation of resources of fresh underground waters of the Sahara. *Geology, geography, global energy*, no. 3 (70) 2018, P. 18-30
4. *Hydrogeology Of Africa*. Ed. N. A. Marinov-M.: Nedra, 1978, 371 p.
5. Yershov E. D. *General Geocryology*, Moscow State University, 2002, 682 p.
6. Zharkov M. A. *Paleozoic salt-bearing formations of the world*. Moscow: Nedra, 1974. 390 p.
7. Kartsev A. A., Vagin S. B., Matusevich V. M. *Hydrogeology of oil and gas basins*, Moscow: Nedra, 1986, 244 p.

8. The climate of an era of major biospheric transformations. Tr. GIN RAS; Issue 550) Chief editors: M. A. Semikhatov, N. M. Chumakov. - M: Nauka. 2004. - 299 p
9. Matusevich V. M. Geochemistry of underground waters of the West Siberian megabassin, Moscow: Nedra, 1976, 158 p.
10. Mason B. Fundamentals of Geochemistry M. Nedra, 1971, 312 p.
11. Posokhov E. V. Chemical evolution of the hydrosphere. - L.: Hydrometeoizdat, 1981. - 286 p.
12. Strakhov N. M. Fundamentals of the theory of lithogenesis. Vol. 1. M. Ed. of the USSR Academy of Sciences, 211 p.
13. Timofeev P. P., Kholodov V. N. Evolution of sedimentation basins in the history of the Earth. Izv. AN SSSR, series GEOL. No. 7, 1984 Pp. 10-31
14. Tolstikhin N. I. Cryosphere and cryopegs. University News. Geology and Exploration, 1982, no. 3, Pp. 115-117
15. Yanshin A. L. Main problems of salt accumulation. Problems of salt accumulation. vol. 1, Novosibirsk, 1977, P. 5-15
16. Bein, A. and A. Arad. 1992. Formation of saline groundwaters in the Baltic region through freezing of seawater during glacial periods. Journal of Hydrology. 140, pp. 75-87
17. Bottomley D. J., Katz A., Chan L. H., et al. The origin and evolution of Canadian Shield brines: evaporation or freezing of seawater? New lithium isotope and geochemical evidence from the Slave Craton. - Chem.Geol. - 1999. - № 155. - pp. 295-320
18. Deschamps R., Eschard R., Roussé S. Architecture of Late Ordovician glacial valleys in the Tassili N'Ajjer area (Algeria). Sedimentary Geology, Volume 289, 1 May 2013, pp. 124-147
19. Coggon R., Teagle D., Svith-Duque C., Alt J., Cooper M. Reconstruction past sea water Mg/Ca and Sr/Ca from Mid-Ocean Ridge flank calcium carbonate veins. Science, 26 February 2010, Vol. 327, no 5969, pp. 1114-1117
20. Dodo A. Caractérisation des systemes aquifères transfrontalières du Niger. Managing shared aquifer resources in Africa. Published in 2004 by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Composed by Marina Rubio, 93200 Saint-Denis © UNESCO 2004, pp. 123-128
21. Emery, D. & Myers, K. (eds.) Sequence Stratigraphy. 1996 304 pp.
22. Gosink J.F., Baker G.C. Salt fingering in subsea permafrost: some stability and energy consideration // Journal Geophys. Research. 1990. Vol. 95, N 6. pp. 9575-9583
23. Herut B., Starinsky A., Katz A. et al. The role of sea water freezing in the formation of subsurface brines // Geochim. Cosmochim. Acta. - 1990. - № 54. - pp. 13-21.
24. Hanor, J. S. (1983) Fifty years of thought on the origin and evolution of subsurface sedimentary brines: in Boardman, S.B. (Editor), Revolution in the Earth Sciences: Advances in past half century: Kendall/Hunt, Dubuque, pp. 99-111.
25. Hirst J. P. P, Benbakir A, Payne D. F., Westlake I. (2002) Tunnel valleys, and density flow processes in the Upper Ordovician glacial succession, Illizi Basin, Algeria: Influence on reservoir quality. Journal of Petroleum Geology 25:3 pp. 297-324
26. Hoffman, P.F. & Schrag, D.P., 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. Terra Nova 14, pp. 129-155.
27. Horita J., Zimmermann H., and Holland H. Chemical evolution of sea water during Phanerozoic: Implication from the record of marine evaporates. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 66, 2002, pp. 3733-3756
28. Kirschvink, J.L., Gaidos, E.J., Bertani, L.E., Beukes, N.J., Gutsmer, J., Maepa, L.N. & Steinberger, R.E., 2000. Paleoproterozoic snowball Earth: extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences. Proceedings of the National Academy of Sciences 97, pp. 1400-1405.
29. Lowenstein T.K., Timofeeff M.N., Brennan S.T., Hardie L.A., and Demicco R.V. (2001) Oscillations in Phanerozoic Seawater Chemistry: Evidence from Fluid Inclusions. SCIENCE, v. 294, pp. 1086-1088.
30. Moreau J., Ghienne J.-F., Heron D.P., Rubino J.-L., Deynoux M. 440 Ma ice stream in North Africa. Geology, September 2005; v. 33; no. 9; pp. 753-756
31. Sharaf M.A. & Hussein M.T. Groundwater quality in the Saq aquifer, Saudi Arabia. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrogeologiques, 41 (5) October 1995, pp. 683-696
32. Starinsky, A. and A. Katz. 2003. The formation of natural cryogenic brines. Geochimica et Cosmochimica Acta 67(8), pp. 1475-1484.
33. Tyrrell T. and Zeebe R. History of carbonate ion concentration over the last 100 million years. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 68, No. 17, pp. 3521-3530