

Голейдж Ф., Хафизов С.Ф.

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина), Москва, Россия, goleijfatemehh@gmail.com, khafizov@gubkin.ru

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ХОЛОДНЫХ И ГОРЯЧИХ РОДНИКОВЫХ ВОД В КАРБОНАТНО-ЭВАПОРИТОВЫХ СИСТЕМАХ В РАЙОНАХ АБГАРМ И ГАРАБ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ИРАНА

Анализируются условия формирования перспективных нефтегазоносных коллекторских пород (травертины и известковые туфы) на основе изучения процессов, контролирующих гидрогеохимическую эволюцию родниковых вод, на примере двух районов Абгарм и Гараб Копетдагского осадочного бассейна. В районе Абгарм с увеличением расстояния от источника происходит изменение физико-химических свойств воды, что приводит к увеличению ее минерализации, проводимости и содержания растворенных веществ. Вода источников в районе Гараб характеризуется более высоким уровнем минерализации и стабильным составом. Установлено, что туфы района Абгарм характеризуются пористой структурой, образованной активностью растений, водорослей и микробных матов. Травертины Гараба в основном имеют плотную, слоистую и расслаивающуюся структуру, сформированную в условиях горячих источников. Таким образом, в исследованных районах выявлены два типа континентальных карбонатных отложений, различающихся по своим структурным и потенциальным коллекторским свойствам.

Наилучшие коллекторские свойства имеют известняковые туфы района Абгарм, образовавшиеся в результате биологического воздействия пористых и взаимосвязанных структур. Коллекторские свойства травертинов района Гараб в основном определяются его плотностью и слоистой структурой. Полученные результаты подтверждают идею об отложениях в районах Абгарм и Гараб как о поверхностных аналогах континентальных карбонатных коллекторов. Особенности формирования и структуры этих отложений могут быть использованы для прогнозирования распределения пространственной пористости и проницаемости в аналогичных нефтегазовых бассейнах.

Ключевые слова: континентальные карбонатные отложения, известковый туф, травертин, перспективные нефтегазоносные коллекторские породы, горячий источник, минерализация, районы Абгарм и Гараб, Копетдагский осадочный бассейн, северо-восток Ирана.

Для цитирования: Голейдж Ф., Хафизов С.Ф. Условия формирования нетрадиционных карбонатных коллекторов нефти и газа на основе изучения гидрогеохимической эволюции холодных и горячих родниковых вод в карбонатно-эвапоритовых системах в районах Абгарм и Гараб на северо-востоке Ирана // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2026. - Т.21. - №3. - https://www.ngtp.ru/rub/2026/23_2026.html EDN: WDSWUX

Введение

Известковые туфовые и травертиновые отложения представляют собой континентальные карбонаты, образовавшиеся из источников как холодной, так и теплой воды [Ford, Pedley, 1996;

Capezzuoli, Gandin, Pedley, 2014]. Эти породы привлекают все больше внимания в нефтегазовой геологии не только из-за уникальных механизмов их формирования и палеоэкологического значения, но и из-за их потенциала в качестве нетрадиционных карбонатных резервуаров континентального происхождения.

Континентальные (наземные) карбонаты представляют собой широкий спектр литологических типов (спелеотемы, калькреды, озерные известняки, травертины и известковые туфы), которые в основном осаждаются в субаэральных условиях из богатых бикарбонатом кальция вод в самых разнообразных условиях осадконакопления и диагенеза. Эти карбонаты характеризуются отчетливым набором литологических, петрологических и геохимических свойств, которые отличают их от морских аналогов. За последние 20 лет они превратились из довольно редких примеров в важный новый исследовательский объект [Capezzuoli, Gandin, Pedley, 2014]. Классическим мировым примером, представляющим максимальный интерес геологов-нефтяников, служат карбонатные резервуары континентального генезиса в подсолевых отложениях по обе стороны Атлантики - нефтегазоносного бассейна Сантос (Бразилия), бассейнов Анголы и аналогичные формации в Центральной Италии [Ronchi, Cruciani, 2015]. В них нефть и газ мигрируют и накапливаются благодаря трещинно-кавернозным системам, сформированным в древних озерно-родниковых карбонатах. Другой пример разрабатываемых коллекторов – это травертиновые отложения, которые относятся к формации Мэдисон. Это мощная толща карбонатных пород миссисипского (раннекаменноугольного) возраста, распространенная на западе США и в Канаде, хорошо известная как важная продуктивная толща и водоносный горизонт на территории Монтаны, Вайоминга, Северной и Южной Дакоты [An outlier of Yellowstone's..., 2021]. В отличие от прежней интерпретации микробиалитов для большей части подсолевых карбонатов, В.П. Райт (PW Carbonate Geoscience, Кардифф) и Н. Тоска (Оксфордский университет, Великобритания) опубликовали в 2016 г. статью, в которой представлена эвапоритовая геохимическая модель для подсолевых резервуаров аптской формации Барра-Велья в бассейне Сантос, у берегов Бразилии [Wright, Tosca, 2016]. Авторы наблюдали аналогичное осаждение карбонатов в озере Чад (Центральная Африка), приводящее к росту сферолитов, а также в штате Юта. Ими отмечено, что в подсолевых отложениях Южной Атлантики существует несколько типов резервуаров. Их модель для Барра-Велья «предполагает наличие мелководных эвапоритовых озер, где карбонаты в основном абиотического происхождения образуются из магниевосиликатных гелей, которые позже формируют глинистые матрицы и, следовательно, растворяются, создавая большую часть пористости и влияя на последующие диагенетические процессы». Авторы подчеркивают, что формирование озерных осадочных систем находится под влиянием сложных гидрологических

факторов, отражающих взаимодействие местного климата, тектоники и состава геологического строения водосборного бассейна. Лучшие коллекторские фации в формации Барра-Велья состоят из кристаллических зерен размером в сантиметры, образовавшихся на месте из лучистых волокнистых кальцитов, напоминающих абиотические травертины, причем коллекторы Барра-Велья однородны по своему составу. В то же время авторы отмечают: проблема точной реконструкции условий формирования озерных карбонатов состоит в том, что для этих сложных и высокопродуктивных резервуаров нет прямого аналога, что вызывает споры по поводу их интерпретации. Условия в меловом периоде уникальны для того времени, так как образовались обширные, гиперщелочные озера, вероятно, из-за CO_2 , поступающего из мантии.

Травертины и известковые туфы

В отличие от описанных выше озерных карбонатов, аналоги погребенных травертинов и известковых туфов могут быть детально изучены в современных условиях на поверхности. Обычно термины «известковый туф» и «травертин» используют как синонимы, тогда как они обозначают разные породы. Собственно, туфовые отложения представляют собой карбонаты пресных и холодных источников с пористым каркасом и кальцинированными растительными структурами, характерными для континентальных условий, а травертиновые отложения – это карбонаты горячих источников с более плотной кристаллической структурой. Температурный диапазон образования туфовых отложений условно ограничен 40°C , а травертиновых – выше этой величины.

Формирование этих отложений зависит от таких факторов, как рельеф поверхности, геохимия воды [Garcia, Pla-Pueyo, Nieto, 2014]. Известковые туфовые отложения вместе с сообществами гастропод в них являются важным индикатором определения древнего климата, с которым напрямую связаны условия осадконакопления [Alexandrowicz, Szymanek, Rybska, 2016].

Современные травертины распространены достаточно широко. На рис. 1 приведены данные о распространении обнажений (общее число наблюдений – 1649) с возрастом от полумиллиона лет и до настоящего времени.

В нефтегазовой геологии ископаемые травертины относятся к нетрадиционным карбонатным коллекторам континентального генезиса и признаны важным объектом разведки и добычи нефти и газа. Интерес к ним, как к коллекторам для нефти и газа, объясняется их высокой первичной пористостью (до 40%) за счёт пузырьковых (или пузырьчатых) текстур, формирующихся при дегазации CO_2 на поверхности воды, а также частыми вторичными изменениями (растворение, доломитизация, выщелачивание, трещинообразование), которые

могут существенно улучшать коллекторские свойства, хотя эффект их снижения также может иметь место. Также за счет неравномерного вымывания минерального вещества подземными водами образуется кавернозность. В результате комбинации как первичных условий осадконакопления, так и вторичных изменений, рассматриваемые породы представляют из себя высокопродуктивные коллекторы, их проницаемость достигает сотен миллидарси и более - до 1460 мД [Arnórsson, 1989]. На отдельных образцах значение проницаемости повышается до 15 Да (рис. 2). При погружении они меньше подвержены уплотнению – пористость частично снижается, но порода сохраняет естественную слоистую структуру, микротрещины и пустоты (каустическую пористость).

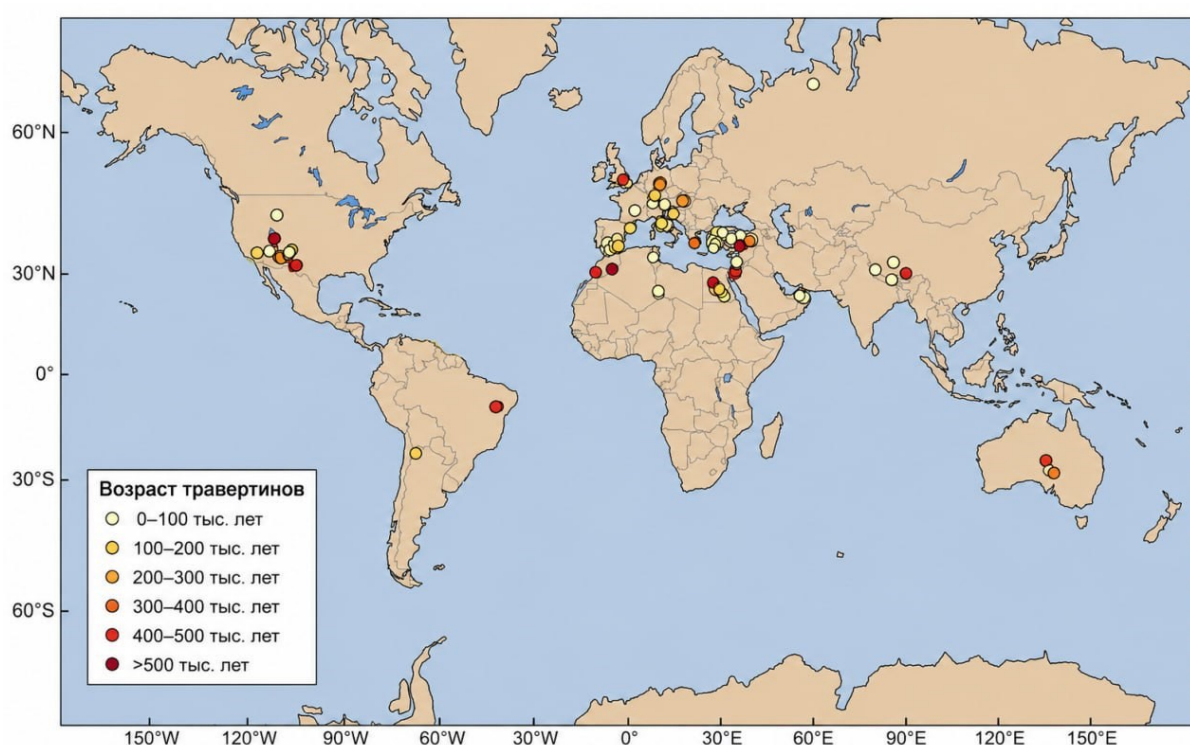


Рис. 1. Схема глобального распределения изученных обнажений отложений травертинов
[Ritter et al., 2017]

Петрофизические свойства современных травертинов и известковых туфов вызывают растущий интерес в связи с их актуальностью в качестве аналогов для карбонатных коллекторов [Claes et al., 2015, 2017; Soete et al., 2015]. Измерения скорости сейсмических волн в травертинах плейстоцена показывают, что пористость, типы пор и цементация контролируют скорости продольных и поперечных волн [Soete et al., 2015]. При всестороннем давлении 40 МПа V_p колеблется в очень широких пределах: от 3695 до 6097 м/с, а V_s – от 2037 до 3140 м/с. Важно отметить, что в травертинах наблюдается специфическое соотношение скорости и пористости, которое отличается от морских карбонатов значительно более высокой анизотропией, поскольку травертины обладают выраженной слоистостью, поэтому

зависимость скорости от пористости резко меняется из-за направления движения волн (параллельно или перпендикулярно напластованию), сильнее, чем у большинства однородных морских осадков, причем более высокие акустические скорости объясняются жесткой архитектурой их каркаса с большими первичными порами [Soete et al., 2015]. Пористость и проницаемость существенно различаются в зависимости от фациального состава. Травертины Будакаласа (Холмы Буда, Венгрия) характеризуются террасовой, пологой склоновой и болотно-озерной фацией с пористостью 5–15%, тогда как в тростниковых фациях, формирующихся в местах выхода минеральных источников среди зарослей тростника, она может достигать 27% [Claes et al., 2017]. Проницаемость сильно анизотропна и в основном контролируется лучшей связностью вдоль параллельных слоев первичных пор [Claes et al., 2017].

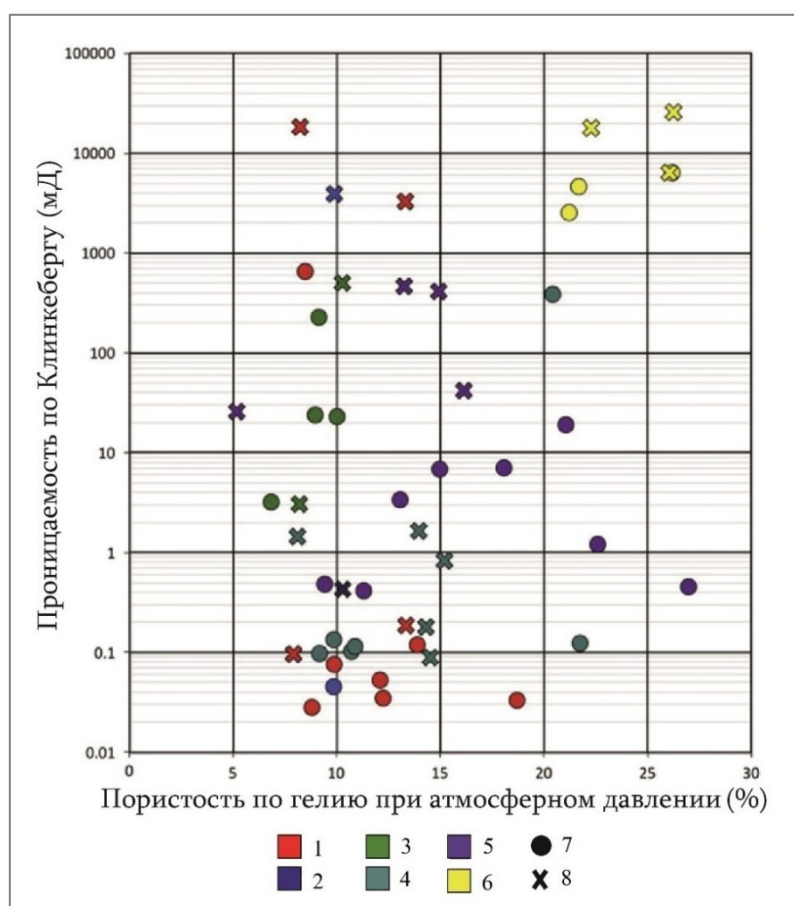


Рис. 2. Диаграмма зависимости измеренной проницаемости от значений пористости для вертикально и горизонтально ориентированных образцов керна

1 - нижний пологий склон, 2 - террасный склон, 3 - болотно-озерная фация, 4 - верхний пологий склон, 5 - нижняя тростниковая фация, 6 - верхняя тростниковая фация, 7 - вертикально ориентированный образец керна, 8 - горизонтально ориентированный образец керна.

Главная проблема прогноза коллекторов, связанная с травертинами и известковыми туфами – их экстремальная гетерогенность. Высокопроницаемые участки могут резко

сменяться плотными, непроницаемыми зонами (например, плотными корками натечных образований или погребенными почвами). Все это делает крайне важным изучение процессов формирования таких отложений в максимально доступных условиях, то есть в обнажениях.

Недавние геохимические и седиментологические исследования, проведенные в окрестностях Тегерана [Rahmani Javanmard et al., 2012], Исфахана [Goudarzi Zadeh, Khan Nasra Esfahani, Kangazian, 2011], Западного Азербайджана [Mor, Roshanak, Keshavarzi, 2012], а также в районах Абгарм и Гараб (Иран), показывают важность понимания процессов формирования туфов и травертинов для прогнозирования распределения их фильтрационно-емкостных свойств. Выполненные работы в районе Абгарм (к юго-востоку от деревни Абгарм, к востоку от Копет-Дага) выявили, что мощные туфовые отложения отлагались непосредственно на известняках моздуранской свиты вблизи водопада, отличающиеся богатым комплексом ископаемых и морфологическим разнообразием.

Главная цель данного исследования – определение химического состава исходных вод, изучение изменений состава этих флюидов наряду с концентрацией растворенных ионов под влиянием прямого контакта подземных вод и горных пород, химическая связь воды в регионе с горными породами, а также исследование изотопного и элементного состава. Понимание механизма формирования пород с различными свойствами и закономерностей их распространения позволяет прогнозировать зоны развития улучшенных коллекторов при реконструкции палеообстановок осадконакопления.

Геологические обстановки осадконакопления в рассматриваемом регионе

Копетдагский осадочный бассейн, частично расположенный на северо-востоке Ирана, также занимает значительную часть Туркменистана и Северного Афганистана [Taherpour et al., 2010]. Этот внутриконтинентальный бассейн сформировался под влиянием раннекиммерийского орогенеза в среднем триасе [Berberian, King, 1981].

Исследуемая территория в районе Абгарм, который является частью Копетдагской структурно-осадочной зоны, расположена в 75 км по прямой от дороги Мешхед-Калат и в 2 км к юго-западу от деревни Абгарм на северо-востоке провинции Мешхед. В окрестностях деревни Абгарм находится одноименный водопад на высоте 1196 м над уровнем моря.

Карбонатные свиты моздуран (верхняя юра) и тирган (нижний мел) широко распространены в регионе и играют важную роль сбора и фильтрации воды (рис. 3). Большинство крупных источников в регионе берут начало в верхнеюрских, остальные – в нижнемеловых комплексах. В этом регионе наблюдается множество долин из-за наличия сдвиговых дислокаций [Afshar Harb, 1994]. Четвертичные известковые туфы, перекрывающие свиту моздуран, образовались к юго-западу от села Абгарм у устья водопада. Известковые

туфовые отложения классифицируются по расстоянию от источника до пяти зон: родника, искусственных прудов и каналов, водопада, низовья водопада и районов, удаленных от него. В районе водопада наблюдается наибольшая толщина осадочных пород благодаря наличию подходящих физико-химических условий, в результате чего сформировалась осадочная толща мощностью 24,5 м (рис. 4). Общий климат этого района очень жаркий летом и осенью, температура воздуха летом достигает 43°C. Травертины четвертичного и современного периодов в районе Гараб расположены на юго-востоке зоны Биналуд и на северо-востоке Ирана, между горным хребтом Биналуд и равниной Мешхеда [Mansori Daneshvar, Pourali, 2015] (см. рис. 3). Этот район находится на высоте 1334 м над уровнем моря.

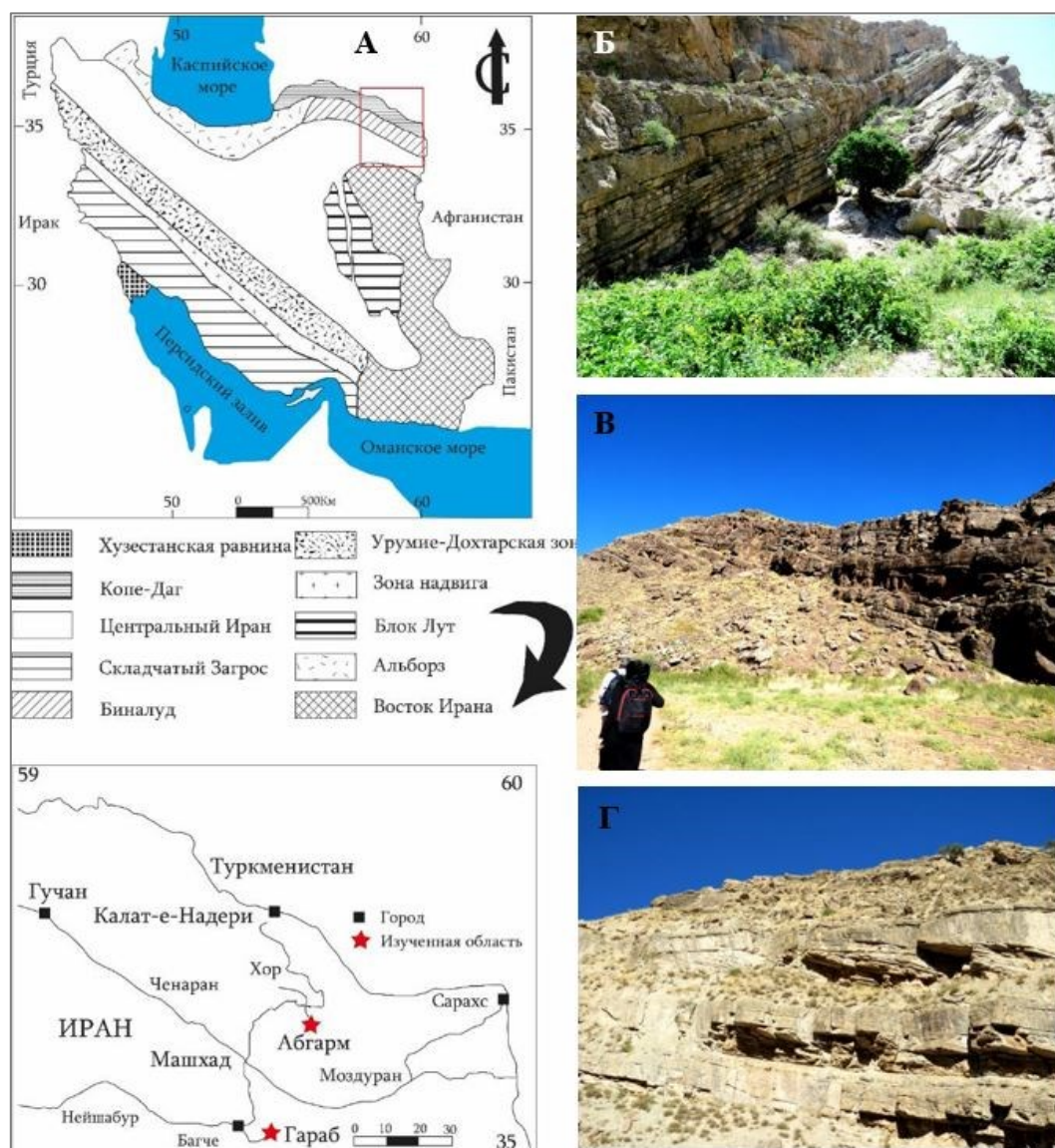


Рис. 3. Схемы местоположения района исследований и фото изучаемых карбонатных обнажений
 А) схема различных структурно-осадочных зон Ирана, а также расположение зоны Копет-Дага относительно зоны Биналуд с перерисовкой [Aghanabati, 2010; Eftekharnesjad, 1980]; Б) фото известняков моздуранской свиты выше водопада Абгарм с видом на юго-восток; В) обнажение красной шуриджеской свиты ниже водопада с видом на север; Г) фото известняков тирганской свиты в разрезе района Абгарм.



Рис. 4. Фото обнажений известковых туфовых отложений

А) общий вид вертикальных водопадов и окружающей их растительности; Б) источник Главный в районе Абгарм, расположенный в известняковых породах свиты моздуран к юго-западу от деревни Абгарм; В) искусственные пруды с растительностью и известняковой галькой по краям; Г-Е) трубки, стебли и ветви растений с окаменевшим покровом мхов.

Обнажения горных пород в зоне Биналуд (область Палеотетиса) представлены, в том числе диоритами, метаофиолитами и гранодиоритами [Karimpour, Stern, Farmer, 2010]. Выход подземных вод в виде горячих источников в районе Гараб происходит через трещины и разломы под влиянием системы разломов Сангбаст-Шандиз на юго-востоке этого района. Этот разлом имеет длину приблизительно 57 км, среднюю ширину – 2 км, расположен в 15 км к западу от г. Мешхед, имея северо-западно-юго-восточное простирание [Zeraatkar, Rahimi, 2013]. Продольные смещения горных пород по этому разлому в позднем четвертичном периоде Сангбаст-Шандиз вызвали появление в этом районе травертиновых источников, состоящих из карбоната кальция, которые разрабатываются открытым способом в юго-восточной части

бассейна в виде оранжевых травертинов (рис. 5). В настоящее время из жерл источников в этом районе видны выбросы CO_2 . Древние и современные отложения травертинов обнажены вдоль неогеновых (плиоценовых) красных мергелей в виде небольших каскадных систем. Этот район состоит из шести систем источников, расположенных на расстоянии приблизительно 500 м друг от друга и часто имеющих конические жерла различных размеров. Высокая концентрация растворенных ионов в этих источниках обусловлена реакцией карбонатных пород и гипсовых слоев в нижних частях и на пути движения воды, что в итоге проявляется в виде отложений травертинов вдоль трещин растяжения на неогеновых осадках. Конус в районе Гараб шириной 4 м, являющийся основным источником травертиновых отложений, расположен на холме высотой 30 м.



Рис. 5. Фотографии различных видов открытого травертинового карьера в районе Гараб

Методология

В данном исследовании проанализировано шесть проб воды из источников и вдоль основного русла р. Абгарм, а также шесть проб из шести источников в районе Гараб для определения содержания основных катионов и анионов воды Ca, Mg, K и Na методом атомно-

абсорбционной спектроскопии с использованием прибора Shimadzu AA-670 HCO_3 , Cl и SO_4 методом титрования в химической лаборатории Университета Фердоуси (г. Мешхед). После отбора проб через 48 час. измерены содержание растворенного кислорода, свободного CO_2 и электропроводность. В течение этого периода все пробы воды хранились в темном месте при температуре 4°C .

В данном исследовании метод сканирующей электронной микроскопии позволил получить трехмерные фотографии поверхностей образцов с большим увеличением. В рамках этого метода проанализировано 10 образцов пород из района Абгарм и Гараб (по пять из каждого) в виде фрагментов размером $1 \times 1 \times 1,5$ см. Образцы подготовлены для изучения внутренней структуры слоев, растительных отложений и нитей водорослей. С помощью метода энергодисперсионной спектроскопии в этих образцах исследованы элементные характеристики, а также изменения химического состава. В этом методе поверхность образцов покрывалась золотом. Визуализация и анализ образцов проводились в центральной лаборатории Университета Фердоуси (г. Мешхед) с использованием сканирующего электронного микроскопа модели 1450VP LEO.

Гидрогеохимия

Средние значения физико-химических свойств проб воды для района Абгарм на шести станциях от истока до водопада общей длиной 900 м и приблизительным расстоянием 150 м представлены в табл. 1. Результаты анализа этих проб показывают, что от основного русла реки вниз по течению основные показатели изменяются разнонаправленно. Водородный показатель воды (pH) составляет от 6,9 до 7,8 (нейтральный до слабощелочного pH), общее содержание растворенных твердых веществ находится в диапазоне от 536,4 до 581,7 мг/л, а электропроводность воды – от 962 до 975 мкс·см, все показатели увеличиваются вниз по течению. Напротив, температура воды снижается с $29,9$ до $23,9^\circ\text{C}$, а количество свободного диоксида углерода уменьшается с 2,2 до 1,1 ppm. Это происходит из-за высвобождения CO_2 из подземных вод под воздействием перепада давлений от источника до водопада. Снижение концентрации свободного CO_2 также приводит к повышению насыщенности кальцием и гидрокарбонатом [Ritter et al., 2017]. Это, в свою очередь, вызывает увеличение содержания растворенного кислорода в воде с 19,8 до 24,1 ppm из-за большего контакта воды с атмосферой и большего растворения кислорода в речной воде. Средние концентрации ионов Ca , Mg и Cl составляют 71,1, 32,2 и 49,9 ppm соответственно, в то время как средние значения анионов HCO_3 и SO_4 – 227,7 и 161,3 ppm соответственно. Натрий, калий и хлор присутствуют в более низких концентрациях – в среднем 22,5, 1,4 и 49,9 ppm соответственно.

Таблица 1

Концентрации основных катионов и анионов, растворенного кислорода, свободного диоксида углерода и растворенных твердых веществ в мг/л, а также кислотность и электропроводность проб воды из района Абгарм

Номер образца	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Cl ⁻	K ⁺	DO	Свободный диоксид углерода	ЕС, мСм/см ¹⁻	TDS	pH	T, °C
1	76,4	38,6	244	146,8	18,8	35,3	1,4	19,8	2,2	962	561,5	6,9	29,9
2	73,3	32,6	244	151,3	21,5	52,9	1,5	22,3	2,2	967	577,1	7,3	27,7
3	71,3	33,8	231,8	169,4	20,7	52,9	1,6	23,4	2,75	971	581,5	7,5	25,4
4	73,3	31,4	207,4	176,2	21,3	70,6	1,5	21,1	2,1	973	581,7	7,6	24,6
5	70,2	29	219,6	156,2	31,7	52,9	1,5	23,7	1,6	973	561,1	7,6	24,4
6	62,3	28,2	219,6	168,1	21,5	35,3	1,4	24,1	1,1	975	536,4	7,8	23,9

Пробы воды в районе Гараб, отобранные из устьев родниковых систем, указывают на наличие высоких концентраций гидрокарбоната (1,9 г/л), хлора (2,9 г/л), натрия (2,3 г/л), сульфата (1,6 г/л), кальция (408,5 ppm) и насыщенности водой по отношению к гидрокарбонату, который считается наиболее важным анионом в природных водах [Nakhaei, 2012]. В целом, все родниковые системы обладают одинаковым количеством основных анионов и катионов (табл. 2). Воды имеют кислый pH с высокой электропроводностью. Электропроводность напрямую зависит от количества растворенных в воде сульфатных и хлорных ионов [Chitsazan et al, 2013]. Вода всех этих источников богата минеральными солями, что сопровождается выделением газа CO₂ и приводит к отложению мощных слоев травертина в этом районе [Zeraatkar, Rahimi, 2013].

Гидрохимический состав континентальных известковых туфов холодных источников в районе Абгарм-е Калат и травертинов горячих источников в районе Гараб связан с высокими концентрациями Ca, HCO₃ и CO₂, которые обусловлены снижением давления на выходе из источников и дегазацией CO₂, что приводит к перенасыщению кальцитом. Фактически, процесс дегазации действует как катализатор для отложения кальцита на выходе из источников. Эти процессы в районе Абгарм-е Калат характеризовались биологической активностью микроорганизмов, водорослей и растений, что привело к формированию пористой структуры с различными аллохтонными и автохтонными группами (рис. 6). Анализ осадочных пород показывает, что растения выступают в качестве основных шаблонов для начала осаждения карбонатов. Этот процесс хорошо отражается в полевых образцах и на фотографиях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, где видны нити водорослей с остатками растений в карбонатном туфе. Со временем эти растения и водоросли разрушаются, оставаясь в виде пустот.

В отличие от них, травертины горячих источников района Гараба имеют совершенно иную структуру. В этой области на процесс осаждения больше всего влияют физико-химические процессы и стабильные потоки жидкости, что приводит к образованию более ламинированной, полосчатой и плотной породы без биологических структур (см. рис. 5).

Состав воды источников в районах Абгарм и Гараб

Тип воды источников во всех трех зонах района Абгарм определен как HCO₃-Ca-Mg на основе тройной диаграммы Пайпера [Piper, 1944] (см. рис. 7), что согласуется с наличием карбонатных пород в этом районе. Значения общего содержания растворенных твердых веществ обусловлены увеличением содержания минералов и уменьшением содержания органических веществ, поэтому вода в системах источников района Абгарм находится в диапазоне пресной (0 -1000 мг) [Nakhaei, 2012].

Таблица 2

Концентрации основных катионов и анионов, электропроводность и кислотность проб воды источников района Гараб

Номер образца	Ca ²⁺ (мг/л)	Mg ²⁺ (мг/л)	HCO ₃ ²⁻ (мг/л)	SO ₄ ²⁻ (мг/л)	Na ⁺ (мг/л)	Cl ⁻ (мг/л)	K ⁺ (мг/л)	ЕС, мСм/с ¹⁻	TDS	pH	T, °C
1	273,2	265,8	1900	1300	2700	3000	139,2	15,8	9577,4	6,4	21,3
2	443,5	123,2	1800	1100	2000	2700	127	16	8293,7	6,1	24
3	487,1	130,4	2000	3800	2200	2900	135,2	16,8	11652,7	6,6	27,7
4	495	125,6	1700	1300	2200	3000	139,2	17	8959,8	6,8	21,9
5	419,8	115,6	2000	1300	2000	2700	138,6	16,4	8674	6,7	26,6
6	332,6	106,3	2000	1000	2800	3500	216,8	19,8	9946,7	7	22,7



Рис. 6. Фотографии карбонатных пород с остатками различных водорослей и растений

А) крупный план обломков кальцитовых стеблей; Б) следы кальцитизированных листьев на фоне кальцитового туфа; В-Ж) наличие растительных микрочастиц в отложениях известкового туфа; З) рост тригональных кристаллов кальцита в пустотах травертиновых отложений.

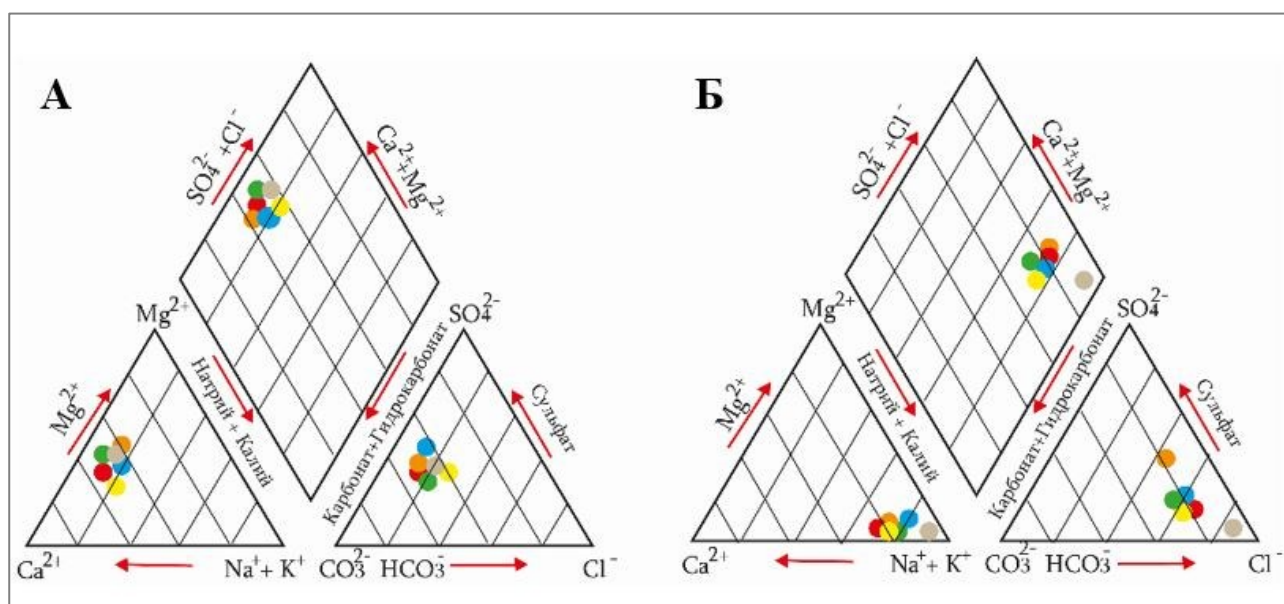


Рис. 7. Диаграммы Пайпера для определения типа воды в исследуемых источниках в районах Абгарм (А) и Гараб (Б)

Тип воды в источниках района Гараб, согласно тройной диаграмме Пайпера, во всех шести системах – Cl-Na- и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ соответственно (см. рис. 7). Наличие высоких концентраций натрия в пробах воды и в травертиновых отложениях в этом районе привело к снижению и, в некоторой степени, к полному прекращению роста растений по берегам этих источников. Высокая концентрация этого элемента токсична для растений и препятствует поглощению воды корнями, что в итоге вызывает потерю растительного покрова в этом районе. Что касается количества общего количества растворенных твердых веществ, то вода источников в районе Гараб качественно находится в диапазоне солоноватой воды (1000-10000 мг). Высокие концентрации натрия вызывают нарушение текстуры почвы, снижение проницаемости и уплотнение почвы [Nakhaei, 2012]. Наличие кристаллов галита отчетливо видно на изображениях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, и в результате анализа методом адсорбции под давлением (рис. 8).

Химия воды и горных пород

Результаты ионного анализа проб воды, а также других гидрохимических параметров, включая температуру, электропроводность, кислотность, свободный диоксид углерода, растворенный кислород и общее количество растворенных твердых веществ, показывают различные тенденции увеличения или уменьшения ниже по течению от источников. В районе Абгарм-е Калат наблюдается положительная корреляция между электропроводностью, показателем pH, растворенным кислородом и общим количеством растворенных твердых веществ, так что они постепенно увеличиваются вниз по течению. Снижение давления CO_2

ниже по течению из-за снижения кислотности приводит к увеличению pH воды [Kele et al., 2011]. По этой причине самый высокий pH измерен у устья водопада с самым низким давлением CO₂. В целом, из-за падения давления, снижения температуры, выделения диоксида углерода образуются кристаллы кальцита, которые формируют толщу осадков. Они отлагаются друг на друге тонкими слоями. В целом, атмосферные воды инфильтрируются в глубинные горизонты, где, взаимодействуя с окружающими породами, растворяют кальций, магний и другие элементы, а также обогащаются CO₂. При последующем выходе этих вод на поверхность снижение парциального давления CO₂ вызывает осаждение карбоната кальция, в результате чего формируются туфовые отложения.

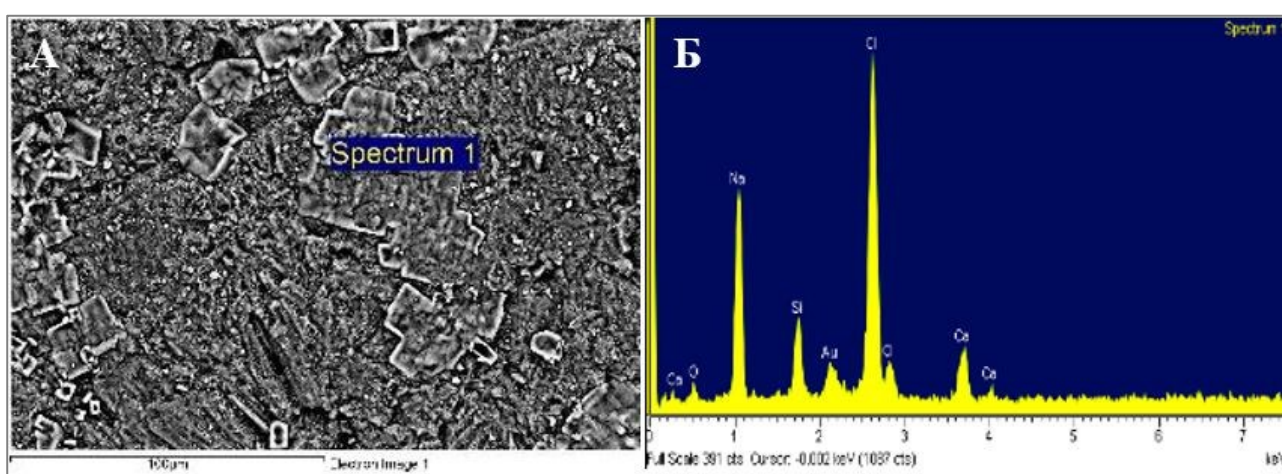


Рис. 8. Электронная микрофотография правильных форм галита в большом количестве в карбонатном матриксе травертиновых отложений в районе Гараб (А) и результат анализа EDS кубических кристаллов и высоких концентраций натрия и хлора в них (Б)

При миграции вверх концентрация карбоната кальция увеличивается, а при выходе на поверхность земли, наряду с понижением температуры и давления, выделением углекислого газа и изменением кислотности, происходит превращение гидрокарбоната кальция в карбонат кальция и его осаждение. Концентрации ионов натрия и кальция также незначительно повышаются по пути от источника к водопаду в районе Абгарм.

Эти изменения согласуются с наибольшим объемом наносов в нижней и южной частях бассейна, что указывает на рост ионного обмена в этом месте, в то время как содержание натрия и магния значительно снижается по мере движения от выхода источника к отдаленным его частям. Повышение концентрации растворенных ионов в воде обусловлено увеличением контакта воды с породой из-за большого расстояния переноса, что приводит к росту значений электропроводности воды ниже по течению [Nakhaei, 2012]. Кальций, как наиболее важный элемент в данном исследовании, играет важную роль в гидрогеохимии района Абгарм. Измеренные значения концентрации ионов кальция указывают на ее значительное снижение

ниже по течению, что обусловлено увеличением отложения кальцита и расходом ионов кальция, растворенных в воде. В целом, типы присутствующих солей и концентрация растворенных веществ в грунтовых водах зависят от состава горных пород и материалов на пути движения подземных вод, скорости движения воды, пройденного расстояния и источника воды. Как правило, количество растворенных солей в воде постепенно увеличивается от точки питания к точке разгрузки [Nakhaei, 2012].

Вода всех трех источников в районе Абгарм проходит через юрские карбонатные породы (известняки и доломитовые известняки) и меловые эвапоритовые отложения (шуриджеская свита). Во время фильтрации через эти породы вода взаимодействует с минералами и растворяет их, в результате чего обогащается ионами кальция (Ca^{2+}), магния (Mg^{2+}), гидрокарбоната (HCO_3^-) и сульфата (SO_4^{2-}). В этом районе ионы кальция и магния являются преобладающими катионами. Они также содержат большое количество двух основных анионов – гидрокарбоната и сульфата. Вероятно, что происхождение ионов является результатом инфильтрации поверхностных вод и растворения известняков, доломитовых известняков и доломитов. Растворенные твердые вещества также могут поддерживать этот процесс, а состав основных ионов, присутствующих в подземных водах, указывает на влияние гидрологии, минералогии и выветривания известняков региона на химические свойства родниковой воды [Narayanan Nair, 1989]. Подземные воды района Абгарм содержат большое количество сульфатов и гидрокарбонатов под влиянием реакции водных флюидов с вмещающими породами [Jalali, 2007], поэтому породы каждого из геологических комплексов, таких как доломитовые известняки моздуранской свиты в северной части, гипсосодержащие глины шуриджеской свиты в южной части и известняки тирганской свиты в средней части, могут быть одним из источников многих ионов, присутствующих в воде этого источника. Происхождение растворенных ионов в подземных водах определялось с использованием стандартных значений соотношения ионов Ca/Mg [Shuster, White, 1971]. В образцах воды из района Абгарм это соотношение составляет от 1,2 до 1,47, что соответствует стандартным значениям 1-3 для доломитовых пород и указывает на прохождение воды в Абгарм районе через доломитовые известняки моздуранской свиты и растворение основных карбонатных ионов этими водами. На основе диаграммы Ca+Mg в зависимости от HCO_3+SO_4 все образцы воды расположены выше линии равновесия (рис. 9), что указывает на вероятное происхождение растворенных в воде ионов кальция и магния в результате инфильтрации атмосферных вод и реакции с карбонатными породами (доломитовыми слоями и доломитовыми известняками моздуранской свиты) наряду с выветриванием и одновременным растворением сульфатных минералов (гипса или ангидрита) [Datta, Tyagi, 1996]. В случае одновременного растворения карбонатов и силикатов значения располагаются вдоль линии

равновесия с отношением, равным единице, другими словами, сумма $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$ будет равна сумме $\text{Ca} + \text{Mg}$. Если кальций и магний в составе воды являются результатом растворения доломита, то это соотношение обычно равно единице, а если – 0,33, то это результат растворения кальцита и доломита [Szramek et al., 2007]. Исходя из этого, можно заключить, что чем выше это ионное соотношение и чем ближе оно к единице, тем больше роль доломита в составе грунтовых вод в этом районе, тогда как более низкие значения указывают на большее влияние кальцита, чем доломита, на гидрохимию района. Следовательно, учитывая молярное ионное соотношение Mg/Ca в районе Абгарм (равное 0,74), в этом районе более сильную роль играют слои доломита и доломитовых известняков с ангидритом. Это ионное соотношение является наилучшим доказательством растворения доломита (дедоломитизации) и ангидрита и отложения кальцита вдоль речного потока.

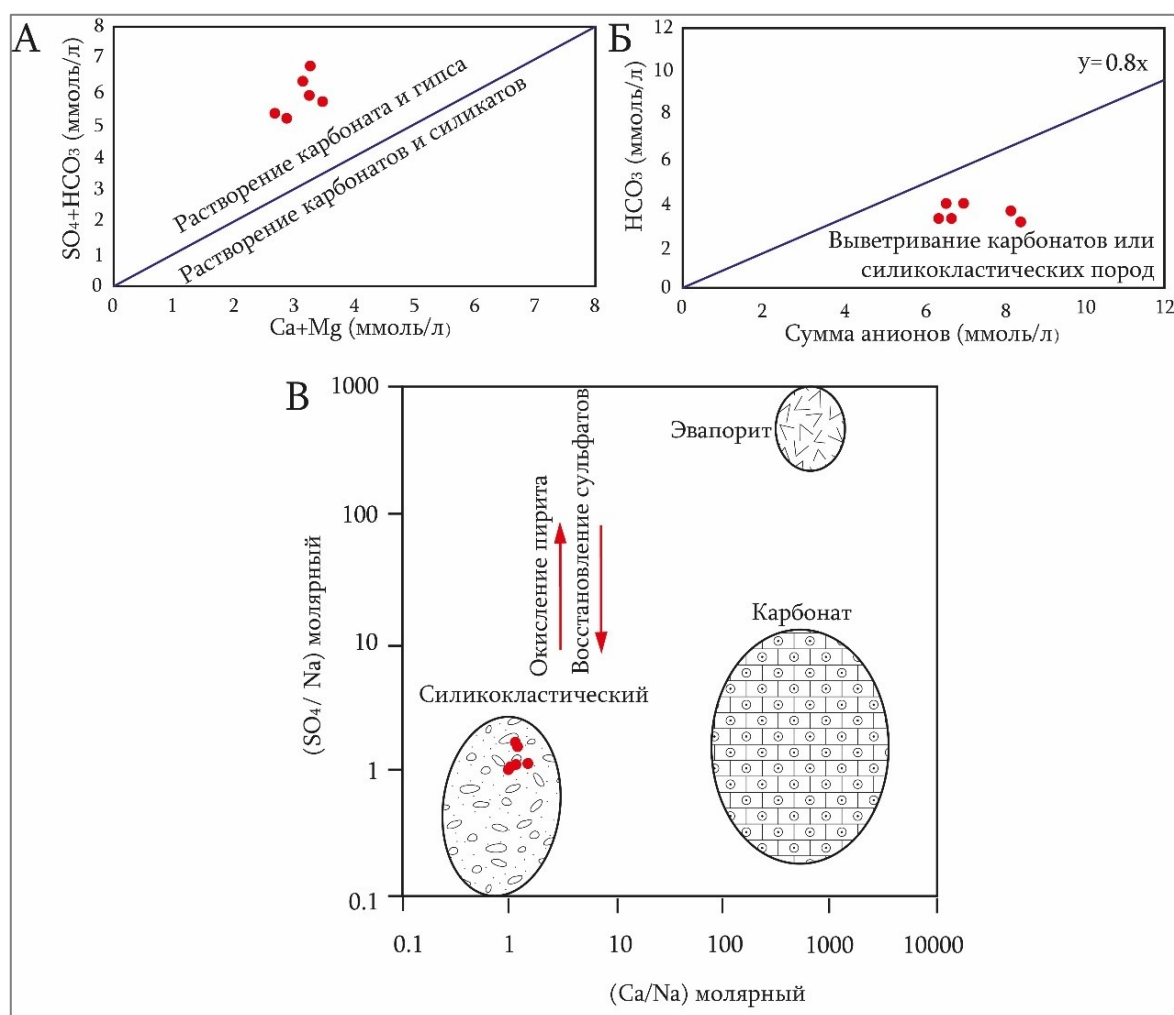


Рис. 9. Диаграммы состава воды в районе Абгарм

А) диаграмма катионного и анионного состава [Datta, Tyagi, 1996] образцов воды, определяющая происхождение ионов, растворенных в воде, после растворения карбонатов; Б) диаграмма катионного и анионного состава [Hounslow, 1995] образцов воды, подтверждающая происхождение ионов кальция и магния после растворения слоев доломита и гипса; В) диаграмма ионных соотношений Ca/Na и SO_4/Na [Leybourne et al., 2009], указывающая на роль кремнистых детритовых отложений свиты шуридже в химическом составе подземных вод.

Кроме того, сравнивая эти результаты с другими примерами, в частности исследованиями А. Хоунслоу [Hounslow, 1995], в которых использовались ионные соотношения $Mg/Mg+Ca$ и $Ca/Ca+SO_4$, можно сделать вывод, что источником растворенных в воде ионов магния и кальция является выветривание доломитовых пород и сульфатов кальция, таких как гипс и ангидрит. Это также подтверждается средним соотношением гидрокарбонатных ионов к общему количеству анионов (0,8) и относительно высоким количеством сульфата, растворенного в воде (см. рис. 9). Данные, полученные из источников в исследуемой области и представленные на объединенной диаграмме ионных соотношений SO_4/Na и Ca/Na , указывают на то, что часть подземных вод в районе Абгарм, вероятно, прошла через кремнистые детритовые отложения последних частей свиты шуридже и повлияла на химический состав воды в этом районе [Leybourne et al., 2009] (см. рис. 9).

В отличие от района Абгарм-е Калат, химический состав источников района Гараб демонстрирует тип воды с преобладанием HCO_3-Ca , $Cl-Na$ и SO_4-Ca состава. Это обусловлено реакцией насыщенных CO_2 флюидов со слоями известняка, соли и хорошо растворимого эоценового гипса. Возможным источником водорастворимых ионов магния также может быть растворение эвапоритовых отложений, таких как гипс.

Схожие значения по отношению к концентрации катионов и растворенных анионов в источниках этого региона и расположение некоторых источников в одном направлении указывают на подземную связь этих флюидов друг с другом под влиянием функционирования активной тектонической системы региона. На основе диаграммы кальция и магния относительно гидрокарбоната в большинстве образцов $Mg+Ca$ находятся ниже линии равновесия (см. рис. 10). Высокая концентрация HCO_3 указывает на растворение кальцита [Mohammadi, Kazemi, 2011]. Кроме того, график $Ca+Mg$ в зависимости от HCO_3+SO_4 показывает влияние одновременного растворения гипса наряду с катионным обменом, а также растворения карбонатов и различных минералов на химический состав подземных вод (см. рис. 10) [Datta, Tyagi, 1996].

Происхождение ионов магния и кальция, растворенных в воде, связано с выветриванием известняковых пластов и горных пород, а также сульфатов кальция, таких как гипс, в этом районе, соответственно. Это также подтверждается соотношением гидрокарбонатных ионов к общему количеству анионов (0,8) и относительно высоким количеством сульфатов, растворенных в воде [Hounslow, 1995] (см. рис. 10).

Построение графика $Ca+Mg$ в зависимости от $Cl+SO_4$ [Mohammadi, Kazemi, 2011] показывает, что образцы с более низкими концентрациями $Cl+SO_4$ находятся выше линии равновесия, что характеризует на выветривание силикатных минералов и увеличение концентрации $Ca+Mg$. Образцы ниже линии равновесия указывают на равновесие хлорид и

сульфат-ионов со щелочами (полевыми шпатами) [Mohammadi, Kazemi, 2011] (см. рис. 10). На основе графика кальция в зависимости от сульфата четко видно, что ионы кальция преобладают над сульфатами из-за усиленного выветривания кальцита и доломита [Garrels, Mackeuzie, 1971] (рис. 10). Наличие более высоких концентраций сульфат-ионов, чем кальция, в образце указывает на постепенное удаление ионов кальция из региональной водной системы за счет осаждения кальцита или усиленного выветривания минералов сульфата магния.

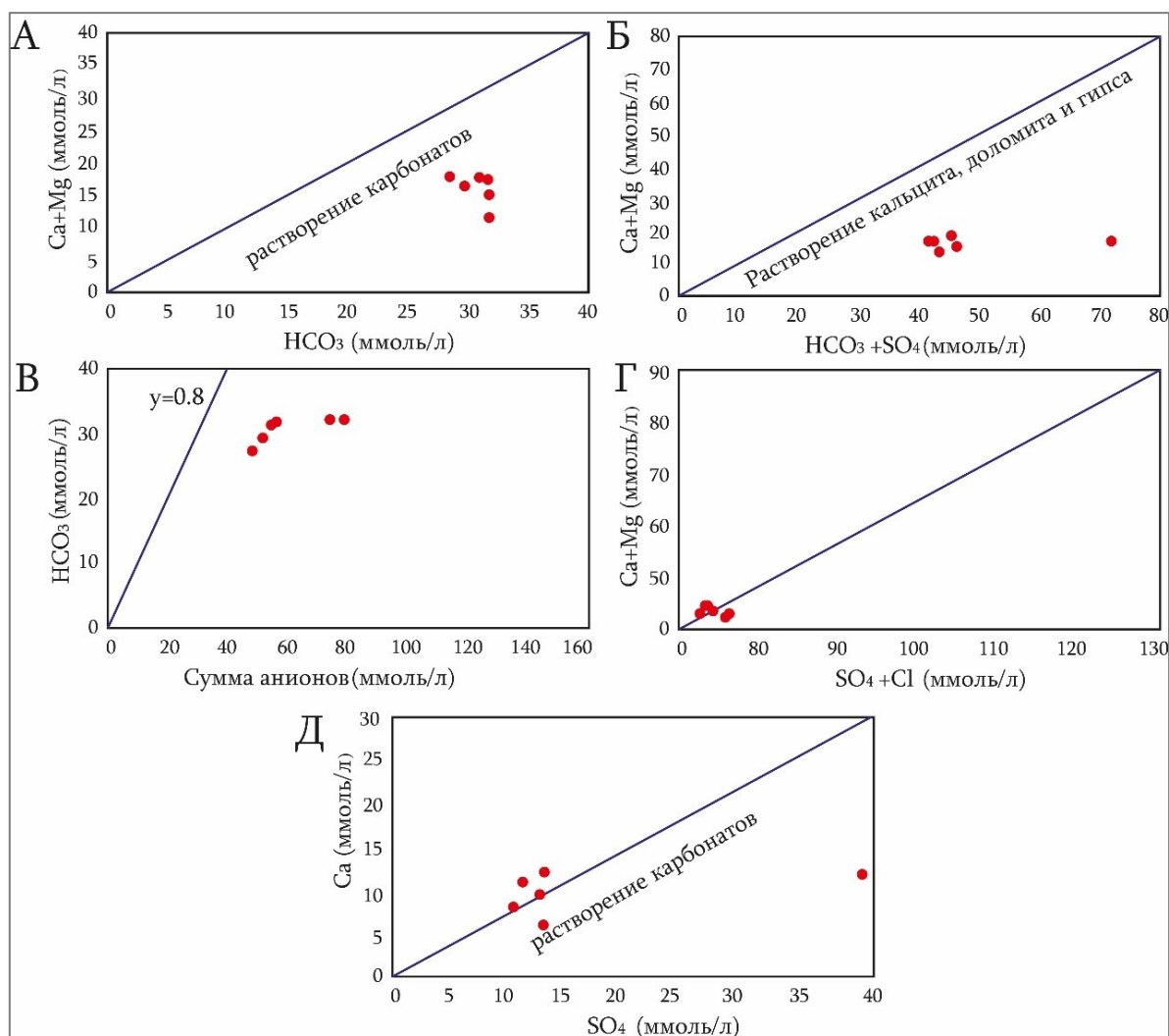


Рис. 10. Диаграммы соотношений растворимых анионов и катионов в изучаемых водах

А) диаграмма соотношения гидрокарбонатов в зависимости от кальция и магния [Datta, Tyagi, 1996], которая показывает растворение минерала гипса и выветривание минералов плагиоклаза и пироксена в дополнение к растворению кальцита; Б) диаграмма соотношения гидрокарбонатов и сульфатов в зависимости от кальция и магния [Datta, Tyagi, 1996], которая показывает происхождение водорастворимых ионов после одновременного растворения гипса и кальцита; В) диаграмма суммы анионов в зависимости от гидрокарбоната [Hounslow, 1995], подтверждающая происхождение водорастворимых ионов после выветривания гипсовых пластов; Г) диаграмма соотношения сульфатов и хлора в зависимости от кальция и магния [Garrels, Mackeuzie, 1971], подтверждающая равновесие ионов хлора и сульфата с полевыми шпатами. Д) диаграмма соотношения сульфатов в зависимости от кальция [Garrels, Mackeuzie, 1971], которая показывает усиление выветривания минералов кальцита в районе Гараб.

Заключение

Типы воды в двух районах Абгарм и Гараб различаются, что обусловлено их геологическими системами. Тип воды в районе Абгарм – $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ (карбонатно-насыщенная вода), тогда как тип воды в районе Гараб тяготеет к Cl-Na и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$, что указывает на более высокую соленость и, следовательно, на различие в происхождении ионов и процессах, контролирующих гидрохимические характеристики в этих двух районах. На гидрохимические показатели воды в основном влияют растворение карбонатных пород (известняки и доломиты) – увеличиваются концентрации гидрокарбонатных, магниевых и кальциевых ионов, растворение эвапоритов (гипс и галит) – увеличиваются концентрации сульфатных, хлорных и натриевых ионов. Кроме того, гидрохимические системы в районах Абгарм и Гараб демонстрируют разнообразие процессов, включая растворение карбонатов, сульфатов и выветривание силикатов, что указывает на многостадийный характер процессов в каждой из этих двух водных систем. С увеличением расстояния от источника воды концентрация ионов и общего содержания растворенных твердых веществ возрастает из-за усиления контакта воды с породами. В районе Абгарм химический состав воды систематически изменяется с расстоянием от источника, что указывает на существование системы, зависящей от потока. Выделение углекислого газа, как доминирующего геохимического механизма, вызывает насыщение карбонатами, что приводит к изменению ионного состава воды и осаждению карбонатов в потоке воды. С другой стороны, увеличение содержания растворенного кислорода в этом потоке обусловлено усилением контакта водной системы с воздухом, что подтверждает влияние физических условий, таких как изменения энергии потока и турбулентность потока, которые напрямую влияют на химическое качество воды. Также в районе Гараб сходный химический состав воды отражает связь подземных источников и влияние активной тектонической системы. Высокие концентрации натрия в районе Гараб оказали негативное экологическое воздействие, снизив рост растений, разрушив структуру почвы и уменьшив ее проницаемость. Данные гидрохимического анализа источников указывают на то, что подземные воды этого района имеют ярко выраженный минеральный состав и более кислую реакцию, чем поверхностные воды.

Наиболее высокие коллекторские свойства демонстрируют известняковые туфы холодных источников района Абгарм, образовавшиеся при активном участии биогенных процессов. Наличие растительных остатков и микробных матов при образовании туфовых отложений формирует пористую взаимосвязанную структуру. С другой стороны, травертины горячих источников района Гараб преимущественно формируются в результате физико-химического осаждения карбонатов и отличаются более плотным, слоистым строением, при этом последующие процессы растворения, трещинообразования и выщелачивания способны

локально значительно улучшать их фильтрационно-емкостные свойства.

Полученные гидрогеохимические данные показывают, что распределение коллекторских свойств напрямую контролируется условиями формирования карбонатных отложений, литологическим составом вмещающих пород и эволюцией системы вода-порода в процессах дегазации CO₂ и осаждения кальцита. Таким образом, путем реконструкции генетической модели образования известковых туфов и травертинов можно прогнозировать пространственное распределение пористости и проницаемости на самых ранних этапах геологической разведки.

Выбор актуальных моделей формирования континентальных карбонатов и их калибровка даже с ограниченным объемом скважинных, петрофизических и геохимических данных создают основу для прогноза зоны развития улучшенных коллекторов в пределах нефтегазоперспективных территорий и отдельных залежей. Такой подход позволяет увеличить точность геологических моделей, уменьшить неопределенность при прогнозировании фильтрационно-емкостных свойств и, как ожидается, повысить эффективность поисково-разведочных работ и освоения карбонатных резервуаров континентального генезиса.

Литература

Afshar Harb A. Kopet Dagh Geology // Geology of Iran Book Project. - 1994. - No. 11. - 275 p. (In Persian).

Aghanabati S.A. Geology of Iran // Publications of the Geological and Mineral Exploration Organization of the country. - 2010. - Third. - 583 p. (In Persian).

Alexandrowicz W.P., Szymanek M., Rybska E. Molluscan assemblages from Holocene calcareous tufa and their significance for palaeoenvironmental reconstructions. A study in the Pieniny Mountains (Carpathians, Southern Poland) // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. - 2016. - Vol. 11. - No. 1. - P. 37-54.

An outlier of Yellowstone's thermal areas: the travertine of Mammoth Hot Springs // U.S. Geological Survey. - 2021. - July 11. - <https://www.usgs.gov/observatories/yvo/news/outlier-yellowstones-thermal-areas-travertine-mammoth-hot-springs>

Arnórsson S. Deposition of calcium carbonate minerals from geothermal waters - theoretical considerations // Geothermics. - 1989. - Vol. 18. - Is. 1-2. - P. 33-39. DOI: 10.1016/0375-6505(89)90007-2

Berberian M., King G.C.P. Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran // Canadian Journal Earth Sciences. - 1981. - Vol. 18. - No. 2. - P. 210-265. DOI: [10.1139/e81-019](https://doi.org/10.1139/e81-019)

Capezzuoli E., Gandin A., Pedley M. Decoding tufa and travertine (freshwater carbonates) in the sedimentary record: The state of the art // Sedimentology. - 2014. - Vol. 61. - Issue 1. - P. 1-21. DOI: [10.1111/sed.12075](https://doi.org/10.1111/sed.12075)

Chitsazan M., Vardanjani Karimi H., Karimi H., Mohammadi Z. Study of the extent of karst development in the desert regions of eastern Iran using stable isotopes // First National Conference on the Application of Stable Isotopes, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. - 2013. - P. 1-10. (In Persian).

Claes H., Marques Erthal M., Soete J., Özkul M., Swennen R. Shrub and pore type classification: Petrography of travertine shrubs from the Ballık-Belevi area (Denizli, SW Turkey // *Quaternary International*. - 2017. - Vol. 437. - P. 147-163. DOI: [10.1016/j.quaint.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.11.002)

Claes H., Soete J., Van Noten K., El Desouky H., Marques Erthal M., Vanhaecke F., Özkul M., Swennen R. Sedimentology, three-dimensional geobody reconstruction and carbon dioxide origin of Pleistocene travertine deposits in the Ballık area (south-west Turkey) // *Sedimentology*. - 2015. - Vol. 62. - No. 5. - P. 1408-1445. DOI: [10.1111/sed.12188](https://doi.org/10.1111/sed.12188)

Datta P.S., Tyagi S.K. Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: Chemical weathering processes and groundwater regime // *Journal of the Geological Society of India*. - 1996. - V. 47. - P. 179-188. DOI: [10.17491/jgsi/1996/470205](https://doi.org/10.17491/jgsi/1996/470205)

Eftekharnjad J. Classification of different parts of Iran based on structural characteristics in relation to sedimentary basins // *Journal of the Petroleum Association*. - 1980. - No. 82. - P. 19-28 (In Persian).

Ford T.D., Pedley H.M. A review of tufa and travertine deposits of the world // *Earth Science Review*. - 1996. - Vol. 4. - P. 117-175. DOI: [10.1016/S0012-8252\(96\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(96)00030-X)

Garcia F., Pla-Pueyo S., Nieto L.M. Sedimentology of geomorphologically controlled Quaternary tufas in a valley in southern Spain // *Facies*. - 2014. - Vol. 60. - P. 53-72. DOI: [10.1007/s10347-013-0361-5](https://doi.org/10.1007/s10347-013-0361-5)

Garrels R.M., Mackenzie F.T. Evolution of sedimentary rocks. 1st ed. - New York: Norton, 1971. - XVI. - 397 p.

Goudarzi Zadeh A., Khan Nasra Esfahani A., Kangazian A. Lithostratigraphic correspondence of travertines of Mount Takhte Sorkh in Ardestan and north of the village of Vertun, northeast of Isfahan // *Second Conference on Earth Sciences, Ashtian, Islamic Azad University, Ashtian Branch*. - 2011. - P. 147-154 (In Persian).

Hounslow A.W. Water quality data: analysis and interpretation. - Florida: CRC Press LLC, 1995. - 416 p.

Jalali M. Stalinization of groundwater in arid and semi-arid zones: an example Tajarak, western Iran // *Environment Geology*. - 2007. - Vol. 52. - P. 1133-1149. DOI: [10.1007/s00254-006-0551-3](https://doi.org/10.1007/s00254-006-0551-3)

Karimpour M.H., Stern C.R., Farmer G.L. Zircon U-Pb geochronology, Sr-Nd isotope analyses, and petrogenetic study of the Dehnow diorite and Kuhsangi granodiorite (Paleo-Tethys), NE Iran // *Journal of Asian Earth Science*. - 2010. - Vol. 37. - P. 384-393. DOI: [10.1016/j.jseaes.2009.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.11.001)

Kele S., Özkul M., Gökgöz A., Főrizs I., Baykara M.O., Alçiçek M.C., Németh T. Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: new evidence of low temperature non-equilibrium calcite-water fractionation // *Sedimentary Geology*. - 2011. - Vol. 238. - P. 191-212. DOI: [10.1016/j.sedgeo.2011.04.015](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.04.015)

Leybourne M.I., Betcher R.N., Mccritchie W.D., Kaszycki C.A., Boyle D.R. Geochemistry and stable isotopic composition of tufa waters and precipitates from the Interlake Region, Manitoba, Canada: Constraints on groundwater origin, calcitization, and tufa formation // *Chemical Geology*. - 2009. - Vol. 260. - P. 221-233. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2008.12.024](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.12.024)

Mansori Daneshvar M.R., Pourali M. Hydrogeochemical and geomorphological investigation of travertine deposition in the Garab Spring region, NE Iran // *Sustainability of integrated water resources management*. - 2015. - Vol. 1. - P. 253-262. DOI: [10.1007/s40899-015-0021-8](https://doi.org/10.1007/s40899-015-0021-8)

Mohammadi A., Kazemi G.A. Influence of geological formations on groundwater quality in the Shoghan Plain aquifer (North Khorasan) // *Earth Sciences*. - 2011. - No. 90. - P. 55-62 (In Persian).

Mor M., Roshanak R., Keshavarzi B. Morphological and petrographic study of travertine deposits around of Qarveh, Bijar, and Takab // 16th Conference of the Geological Society of Iran, Shiraz, Geological Society of Iran, Shiraz University. - 2012. - P. 1-8 (In Persian).

Nakhaei M. Introduction to Groundwater. Arad Publishing, 2nd edition. - 2012. - 183 p. (In Persian).

Narayanan Nair V. Hydrochemical modeling // Proceedings of the International NGRI Symposium, Hyderabad. - 1989. - Vol. 7. - P. 903-906.

Piper A.M. A graphical interpretation of water analysis // Transactions of the American Geophysical Union. - 1944. - Vol. 25. - Issue 6. - P. 914-928. DOI: [10.1029/TR025i006p00914](https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914)

Rahmani Javanmard S., Tooti F., Omidian P., Ranjbaran M. Mineralogy and genesis of ridge-rift type travertines and Abe-esk veins based on petrographic studies and carbon and oxygen isotopic analyses // Iranian Geological Quarterly. - 2012. - No. 11. - P. 51-61.

Ritter S.M., Isenbeck-Schröter M., Schröder-Ritzrau A., Scholz C., Frank N. Geochemical insights into an active calcareous tufa depositing system in Southern Germany // Procedia Earth and Planetary Science. - 2017. - Vol. 17. - P. 328-331. DOI: [10.1016/j.proeps.2016.12.083](https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.083)

Ronchi P., Cruciani F. Continental carbonates as a hydrocarbon reservoir, an analog case study from the travertine of Saturnia, Italy // AAPG Bulletin. - 2015. - Vol. 99. - № 4. - P. 711-734. DOI: [10.1306/10021414026](https://doi.org/10.1306/10021414026)

Shuster E.T., White W.B. Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs, a possible means for characterizing carbonate aquifer // Journal of Hydrogeology. - 1971. - Vol. 14. - P. 93-128. DOI: [10.1016/0022-1694\(71\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90001-1)

Soete J., Kleipool L.M., Claes H., Claes S., Hamaekers H., Kele S., Özkul M., Foubert A., Reijmer J.J.G., Swennen R. Acoustic properties in travertines and their relation to porosity and pore types // Marine and Petroleum Geology. - 2015. - Vol. 59. - P. 320-335. DOI: [10.1016/j.marpetgeo.2014.09.004](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.09.004)

Szramek K., McIntosh J.C., Williams E.L., Kanduc T., Ogrinc N., Walter L.M. Relative weathering intensity of calcite versus dolomite in carbonate-bearing temperate zone watersheds: Carbonate geochemistry and fluxes from catchments within the St. Lawrence and Danube River basins // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. - 2007. - Vol. 8. - № 4. - P. 1-26. DOI: [10.1029/2006GC001337](https://doi.org/10.1029/2006GC001337)

Taherpour Khalil Abad M., Conrad M.A., Aryaei A.A., Ashouri A.R. Barremian-Aptian Dasycladalean algae, new and revisited, from the Tigran Formation in the Kopet Dag, NE Iran // Notebooks on Geology. - 2010. - No. 5. - P. 1-13. DOI: [10.4267/2042/33368](https://doi.org/10.4267/2042/33368)

Wright P., Tosca N. A geochemical model for the formation of the pre-salt reservoirs, Santos Basin, Brazil: implications for understanding reservoir distribution // AAPG Search and Discovery. - 2016. - June 19-22. - Article 51304.

Zeraatkar K., Rahimi B. Survey of Sangbast-Shandiz fault zone growth and geomorphological results // Journal of Geography and Regional Development. - 2013. - Vol. 10. - Is. 2. - No. 19. DOI: [10.22067/geography.v0i0.23246](https://doi.org/10.22067/geography.v0i0.23246)

This is an open access article under the CC BY 4.0 license

Received 15.06.2026

Published 18.09.2026

Goleij F., Khafizov S.F.

Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin, Moscow, Russia, goleijfatemehh@gmail.com, khafizov@gubkin.ru

FORMATION CONDITIONS OF UNCONVENTIONAL CARBONATE PETROLEUM RESERVOIRS BASED ON THE STUDY OF THE HYDROGEOCHEMICAL EVOLUTION OF COLD AND HOT SPRING WATERS IN CARBONATE-EVAPORITE SYSTEMS IN THE ABGARM AND GARAB AREAS OF NORTHEAST IRAN

This study analyzes the formation conditions of promising petroleum reservoir rocks—travertines and calcareous tuffs—by studying the processes controlling the hydrogeochemical evolution of spring waters. This study examines two areas of the Kopet Dagh sedimentary basin (Abgarm and Garab), where these conditions can be studied beneath surface outcrops, with an emphasis on water-rock interactions. In Abgarm, the physicochemical properties of the water change with increasing distance from the spring, leading to increased mineralization, conductivity, and dissolved solids. Water in the Garab springs is characterized by higher mineralization and a more stable composition. Abgarm tuffs have been shown to have a porous structure formed by the activity of plants, algae, and microbial mats. Garab travertines are characterized by a predominantly dense, layered, and stratified structure formed under hot spring conditions. Thus, the studied areas demonstrate two types of continental carbonate strata, differing in their structural and potential reservoir properties.

The limestone tuff in Abgarm, formed by biological action and the formation of porous and interconnected structures, exhibits the best reservoir properties. The reservoir properties of the travertine in Garab are primarily determined by its density and layered structure. The obtained results support the idea that Abgarm and Garab are surface analogs of continental carbonate reservoirs and indicate that the formation and structure features of these strata can be used to predict the distribution of spatial porosity and permeability in similar petroleum basins.

Keywords: *continental carbonate strata, calcareous tufa, travertine, petroleum reservoir rocks, hot spring, mineralization, Abgarm, Garab, Kopet Dagh sedimentary basin, northeastern Iran.*

For citation: Goleij F., Khafizov S.F. Formation conditions of unconventional carbonate petroleum reservoirs based on the study of the hydrogeochemical evolution of cold and hot spring waters in carbonate-evaporite systems in the Abgarm and Garab areas of northeast Iran. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2026, vol. 21, no. 3, available at: https://www.ngtp.ru/rub/2026/23_2026.html EDN: WDSWUX

References

Afshar Harb A. *Kopet Dagh Geology*. Geology of Iran Book Project, 1994, no. 11, 275 p. (In Persian).

Aghanabati S. A. *Geology of Iran*. Publications of the Geological and Mineral Exploration Organization of the country, 2010, Third, 583 p. (In Persian).

Alexandrowicz W.P., Szymanek M., Rybska E. Molluscan assemblages from Holocene calcareous tufa and their significance for palaeoenvironmental reconstructions. A study in the Pieniny Mountains (Carpathians, Southern Poland). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 37-54.

An outlier of Yellowstone's thermal areas: the travertine of Mammoth Hot Springs. U.S. Geological Survey, 2021, July 11, available at: <https://www.usgs.gov/observatories/yvo/news/outlier-yellowstones-thermal-areas-travertine-mammoth-hot-springs>

Arnórsson S. Deposition of calcium carbonate minerals from geothermal waters - theoretical

- considerations. *Geothermics*, 1989, vol. 18, is. 1-2, pp. 33-39. DOI: [10.1016/0375-6505\(89\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0375-6505(89)90007-2)
- Berberian M., King G.C.P. Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal Earth Sciences*, 1981, vol. 18, no. 2, pp. 210-265. DOI: [10.1139/e81-019](https://doi.org/10.1139/e81-019)
- Capezzuoli E., Gandin A., Pedley M. Decoding tufa and travertine (freshwater carbonates) in the sedimentary record: The state of the art. *Sedimentology*, 2014, vol. 61, issue 1, pp. 1-21. DOI: [10.1111/sed.12075](https://doi.org/10.1111/sed.12075)
- Chitsazan M., Vardanjani Karimi H., Karimi H., Mohammadi Z. Study of the extent of karst development in the desert regions of eastern Iran using stable isotopes. *First National Conference on the Application of Stable Isotopes, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad*, 2013, pp. 1-10. (In Persian).
- Claes H., Marques Erthal M., Soete J., Özkul M., Swennen R. Shrub and pore type classification: Petrography of travertine shrubs from the Ballık-Belevi area (Denizli, SW Turkey). *Quaternary International*, 2017, vol. 437, pp. 147-163. DOI: [10.1016/j.quaint.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.11.002)
- Claes H., Soete J., Van Noten K., El Desouky H., Marques Erthal M., Vanhaecke F., Özkul M., Swennen R. Sedimentology, three-dimensional geobody reconstruction and carbon dioxide origin of Pleistocene travertine deposits in the Ballık area (south-west Turkey). *Sedimentology*, 2015, vol. 62, no. 5, pp. 1408-1445. DOI: [10.1111/sed.12188](https://doi.org/10.1111/sed.12188)
- Datta P.S., Tyagi S.K. Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: Chemical weathering processes and groundwater regime. *Journal of the Geological Society of India*, 1996, vol. 47, P. 179-188. DOI: [10.17491/jgsi/1996/470205](https://doi.org/10.17491/jgsi/1996/470205)
- Eftekharnjad J. Classification of different parts of Iran based on structural characteristics in relation to sedimentary basins. *Journal of the Petroleum Association*, 1980, no. 82, pp. 19-28 (In Persian).
- Ford T.D., Pedley H.M. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth Science Review*, 1996, vol. 4, pp. 117-175. DOI: [10.1016/S0012-8252\(96\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(96)00030-X)
- Garcia F., Pla-Pueyo S., Nieto L.M. Sedimentology of geomorphologically controlled Quaternary tufas in a valley in southern Spain. *Facies*, 2014, vol. 60, pp. 53-72. DOI: [10.1007/s10347-013-0361-5](https://doi.org/10.1007/s10347-013-0361-5)
- Garrels R.M., Mackenzie F.T. *Evolution of sedimentary rocks*. 1st ed. New York: Norton, 1971, XVI, 397 p.
- Goudarzi Zadeh A., Khan Nasra Esfahani A., Kangazian A. Lithostratigraphic correspondence of travertines of Mount Takhte Sorkh in Ardestan and north of the village of Vertun, northeast of Isfahan. *Second Conference on Earth Sciences, Ashtian, Islamic Azad University, Ashtian Branch*, 2011, pp. 147-154 (In Persian).
- Hounslow A.W. *Water quality data: analysis and interpretation*. Florida: CRC Press LLC, 1995, 416 p.
- Jalali M. Stalinization of groundwater in arid and semi-arid zones: an example Tajarak, western Iran. *Environment Geology*, 2007, vol. 52, pp. 1133-1149. DOI: [10.1007/s00254-006-0551-3](https://doi.org/10.1007/s00254-006-0551-3)
- Karimpour M.H., Stern C.R., Farmer G.L. Zircon U-Pb geochronology, Sr-Nd isotope analyses, and petrogenetic study of the Dehnow diorite and Kuhsangi granodiorite (Paleo-Tethys), NE Iran. *Journal of Asian Earth Science*, 2010, vol. 37, pp. 384-393. DOI: [10.1016/j.jseaes.2009.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.11.001)
- Kele S., Özkul M., Gökgöz A., Fórizs I., Baykara M.O., Alçiçek M.C., Németh T. Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: new evidence of low temperature non-equilibrium calcite-water fractionation. *Sedimentary Geology*, 2011, vol. 238, pp. 191-212. DOI: [10.1016/j.sedgeo.2011.04.015](https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.04.015)
- Leybourne M.I., Betcher R.N., Mcritchie W.D., Kaszycki C.A., Boyle D.R. Geochemistry and stable isotopic composition of tufa waters and precipitates from the Interlake Region, Manitoba, Canada: Constraints on groundwater origin, calcitization, and tufa formation. *Chemical Geology*, 2009, vol. 260, pp. 221-233. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2008.12.024](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.12.024)
- Mansori Daneshvar M.R., Pourali M. Hydrogeochemical and geomorphological investigation of travertine deposition in the Garab Spring region, NE Iran. *Sustainability of integrated water*

resources management, 2015, vol. 1, pp. 253-262. DOI: [10.1007/s40899-015-0021-8](https://doi.org/10.1007/s40899-015-0021-8)

Mohammadi A., Kazemi G.A. Influence of geological formations on groundwater quality in the Shoghan Plain aquifer (North Khorasan). *Earth Sciences*, 2011, no. 90, pp. 55-62 (In Persian).

Mor M., Roshanak R., Keshavarzi B. Morphological and petrographic study of travertine deposits around of Qarveh, Bijar, and Takab. *16th Conference of the Geological Society of Iran, Shiraz, Geological Society of Iran, Shiraz University*, 2012, pp. 1-8 (In Persian).

Nakhaei M. *Introduction to Groundwater*. Arad Publishing, 2nd edition, 2012, 183 p. (In Persian).

Narayanan Nair V. Hydrochemical modeling. *Proceedings of the International NGRI Symposium*, Hyderabad, 1989, vol. 7, pp. 903-906.

Piper A.M. A graphical interpretation of water analysis. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1944, vol. 25, issue 6, pp. 914-928. DOI: [10.1029/TR025i006p00914](https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914)

Rahmani Javanmard S., Tooti F., Omidian P., Ranjbaran M. Mineralogy and genesis of ridge-rift type travertines and Abe-esk veins based on petrographic studies and carbon and oxygen isotopic analyses. *Iranian Geological Quarterly*, 2012, no. 11, pp. 51-61.

Ritter S.M., Isenbeck-Schröter M., Schröder-Ritzrau A., Scholz C., Frank N. Geochemical insights into an active calcareous tufa depositing system in Southern Germany. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, vol. 17, pp. 328-331. DOI: [10.1016/j.proeps.2016.12.083](https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.083)

Ronchi P., Cruciani F. Continental carbonates as a hydrocarbon reservoir, an analog case study from the travertine of Saturnia, Italy. *AAPG Bulletin*, 2015, vol. 99, no. 4, pp. 711-734. DOI: [10.1306/10021414026](https://doi.org/10.1306/10021414026)

Shuster E.T., White W.B. Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs, a possible means for characterizing carbonate aquifer. *Journal of Hydrogeology*, 1971, vol. 14, pp. 93-128. DOI: [10.1016/0022-1694\(71\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90001-1)

Soete J., Kleipool L.M., Claes H., Claes S., Hamaekers H., Kele S., Özkul M., Foubert A., Reijmer J.J.G., Swennen R. Acoustic properties in travertines and their relation to porosity and pore types. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, vol. 59, pp. 320-335. DOI: [10.1016/j.marpetgeo.2014.09.004](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.09.004)

Szramek K., McIntosh J.C., Williams E.L., Kanduc T., Ogrinc N., Walter L.M. Relative weathering intensity of calcite versus dolomite in carbonate-bearing temperate zone watersheds: Carbonate geochemistry and fluxes from catchments within the St. Lawrence and Danube River basins. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, vol. 8, no. 4, pp. 1-26. DOI: [10.1029/2006GC001337](https://doi.org/10.1029/2006GC001337)

Taherpour Khalil Abad M., Conrad M.A., Aryaei A.A., Ashouri A.R. Barremian-Aptian Dasycladalean algae, new and revisited, from the Tigran Formation in the Kopet Dag, NE Iran. *Notebooks on Geology*, 2010, no. 5, pp. 1-13. DOI: [10.4267/2042/33368](https://doi.org/10.4267/2042/33368)

Wright P., Tosca N. A geochemical model for the formation of the pre-salt reservoirs, Santos Basin, Brazil: implications for understanding reservoir distribution. *AAPG Search and Discovery*, 2016, June 19-22, Article 51304.

Zeraatkar K., Rahimi B. Survey of Sangbast-Shandiz fault zone growth and geomorphological results. *Journal of Geography and Regional Development*, 2013, vol. 10, is. 2, no. 19. DOI: [10.22067/geography.v0i0.23246](https://doi.org/10.22067/geography.v0i0.23246)