

## Палеогидрогеохимия нефтегазоносных отложений Анабаро-Хатангского бассейна

А.В.ЧЕРНЫХ, Д.А.НОВИКОВ (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН); 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, д. 3; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет; 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2)

Установлено, что развитие водонапорной системы Анабаро-Хатангского бассейна проходило в 12 гидрогеологических циклов. Наиболее высокая палеосолёность сингенетичных вод отвечала солеродному бассейну нижнего девона и характеризовалась величиной солёности рапы до 320–330 г/дм<sup>3</sup> (стадия садки галита). Девонский солеродный бассейн сыграл ключевую роль в процессах формирования химического состава подземных вод и рассолов в районах распространения солянокупольных структур (Нордвик, Южный Тигян, Ильинская, Кожевникова, Ледовка и Белая). Изучение современной гидрогеохимии нефтегазоносных отложений показало, что рассолы выщелачивания в исследуемом районе стали причиной инверсионного типа вертикальной гидрогеохимической зональности. В условиях отсутствия соляных диапиров развит прямой (нормальный) тип вертикальной гидрогеохимической зональности.

*Ключевые слова:* периодизация гидрогеологической истории, гидрогеологический цикл, палеогидрогеохимия, соляной купол, рассол, инфильтрация, элизия, Анабаро-Хатангский бассейн, Арктика.

Черных Анатолий Витальевич



tolyachernykh@gmail.com

Новиков Дмитрий Анатольевич  
кандидат геолого-минералогических наук

NovikovDA@ipgg.sbras.ru

## Paleohydrogeochemistry of oil and gas bearing deposits of the Anabar-Khatanga basin

A.V.CHERNYKH, D.A.NOVIKOV (Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Novosibirsk State University)

It is established that the development of the water drive system of the Anabar-Khatanga Basin was carried out in 12 hydrogeological cycles. The highest paleosalinity of syngenetic waters belonged to the salt basin of the Lower Devonian and was characterized by the salinity of brine to 320–330 g/dm<sup>3</sup> (stage of halite). The devonian salt basin played a key role in the formation of the chemical composition of groundwater and brines in the areas of the distribution of salt-dome structures of the Anabar-Khatanga Basin (Nordvik, Southern Tigyan, Ilyinskaya, Kozhevnikova, Ledovka and Belaya). The study of recent hydrogeochemistry of oil and gas bearing deposits reveal that leaching brines in the study area caused the inversion type of vertical hydrogeochemical zoning. In the absence of salt diapirs, a direct (normal) type of vertical hydrogeochemical zoning is developed.

*Key words:* periodization of hydrogeological history, hydrogeological cycle, paleohydrogeochemistry, salt dome, brine, infiltration, elision, Anabar-Khatanga basin, Arctic.



Интерес недропользователей к АХБ в последние годы требует детального изучения гидрогеологических условий, учитывая, что здесь поисковые работы осложнены рядом факторов: мощная криогенная толща с криопэгмами (отрицательно-температурные солёные воды и рассолы с температурой от 0 до  $-12$  °С), низкие температуры атмосферного воздуха большую часть года, отсутствие транспортной инфраструктуры и др. Гидрогеологическая изученность исследуемой территории крайне низка, нефтегазопроявления выявлены по всему разрезу. Остаётся нерешённым множество вопросов начиная от изучения процессов формирования химического и газового состава подземных вод и рассолов, криогенного метаморфизма рассолов, геотермической зональности, структуры гидродинамического поля и др. и, заканчивая разработкой гидрогеологических критериев нефтегазоносности. В настоящей работе рассмотрены палеогидрогеохимические аспекты этой многогранной проблемы.

**Фактический материал и методика исследований.** Палеогидрогеологические реконструкции осадочных бассейнов выполняются с середины прошлого века. Реконструкция гидрогеологической истории осадочного бассейна основывается на периодизации – выделении гидрогеологических циклов и этапов. Гидрогеологический цикл начинается с трансгрессии, включает в себя процессы осадконакопления с одновременным захоронением седиментационных вод, охватывает время последующего поднятия и регрессии и заканчивается новым погружением и трансгрессией. Первая часть гидрогеологического цикла (от начала трансгрессии до начала регрессии) образует седиментационный (элизионный) этап. Вторая часть гидрогеологического цикла – инфильтрационный этап, когда в осадочный бассейн проникают инфильтрационные воды, постепенно вытесняя и замещая седиментационные [3]. Ввиду несоответствия границ некоторых циклов границам крупных стратиграфических подразделений (эратемам, системам, отделам) их название было дано по приуроченности к общепринятым в стратиграфической шкале ярусам.

При проведении палеогидрогеохимических реконструкций АХБ в основу были положены палеогеографические карты, составленные сотрудниками ИНГГ СО РАН, и методика, предложенная Е.А.Басковым [1], некоторые аспекты которой были уточнены Я.В.Садыковой [13]. Она основывается на естественно-историческом подходе

и использовании современных гидрохимических эталонов при выборе величины минерализации и концентраций основных компонентов солевого состава сингенетичных вод древних морских и озёрно-аллювиальных бассейнов. При континентальном осадконакоплении в денудационных и денудационно-аккумулятивных областях (низкие горы, денудационные плато) преобладают процессы инфильтрации пресных метеогенных вод с минерализацией до  $0,5$  г/дм<sup>3</sup> и с преобладанием ионов  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . В пределах равнин инфильтрационный обмен приводит к формированию пресных и солоноватых инфильтрационных вод с минерализацией  $0,5$ – $2$  г/дм<sup>3</sup> с преобладанием в составе ионов  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$  при повышенном содержании  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ . В областях переходного осадконакопления (прибрежное мелководье и прибрежно-морская равнина) происходит захоронение солоноватых вод с минерализацией  $2$ – $5$  г/дм<sup>3</sup> и преобладанием в составе ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  при повышенном содержании  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . В мелководно-морских обстановках (глубина до  $50$  м) захороняются сингенетичные солоноватые воды с минерализацией  $5$ – $15$  г/дм<sup>3</sup> с преобладанием в составе ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  при повышенном содержании ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . В более глубоководных частях бассейна солёность вод достигает  $15$ – $20$  г/дм<sup>3</sup> и в составе преобладают ионы  $\text{Mg}^{2+}$ . В замкнутых бассейнах, лагунах, прибрежных себхах, солончаках или солёных озёрах минерализация захораниваемых вод достигает  $50$ – $400$  г/дм<sup>3</sup>, в составе преобладают ионы  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ . При испарительном концентрировании морской воды в закрытых бассейнах установлено 8 стадий [21, 22]: известняковая (величина общей минерализации  $M=15$ – $36$  г/дм<sup>3</sup>), доломитовая ( $M=72$ – $85$  г/дм<sup>3</sup>), гипсовая ( $M=135$ – $150$  г/дм<sup>3</sup>), галитовая ( $M=320$  г/дм<sup>3</sup>), эпсомитовая ( $M=400$  г/дм<sup>3</sup>), сильвинитовая ( $M=410$  г/дм<sup>3</sup>), карналитовая ( $M=440$  г/дм<sup>3</sup>), бишофитовая ( $M=522$  г/дм<sup>3</sup>). Основной солью, осаждающейся при испарении морской воды, является галит ( $\text{NaCl}$ ). Увеличение минерализации и плотности рассола происходит за счёт появления в нём всё более растворимых соединений. При этом сульфатно-хлоридная натриевая морская вода на стадии осаждения гипса становится хлоридной магниево-натриевой, эпсомита – сульфатно-хлоридной натриево-магниевой, карналита – хлоридной магниевой. Такой состав сохраняется и на заключительной эвтонической стадии галогенеза, когда из предельно насыщенного маточного раствора осаждаются

бишофит, а сам эвапоритовый бассейн прекращает своё существование.

Основой для научных исследований послужили фондовые и опубликованные материалы научных и производственных организаций (ИНГГ СО РАН, СНИИГГиМС, НИИГА, ЗАО «Координационный центр «РОСГЕОФИЗИКА»). Электронная база данных представлена результатами испытания 120 объектов 15 поисковых площадей, включает 255 анализов химического состава подземных вод и рассолов, 4 пробы водорастворённого газа, 3 пробы растворённого органического вещества. Также были использованы опубликованные материалы по геохимии поверхностных вод себх (замкнутых бессточных понижений, покрытых солончаками) и составлена электронная база, включающая в себя 163 анализа химического состава природных вод разных геохимических стадий развития бассейнов [22, 25–27, 29].

**Геолого-гидрогеологические особенности.** Анабаро-Хатангский бассейн характеризуется следующими ярковыраженными особенностями: наличием криолитозоны до 500 м, соляно-купольных структур и, как следствие, развитием высокоминерализованных рассолов и криопэггов [10]. Во время поисковых работ на нефть и газ в пределах изученных структур выявлены рассолы на Гуримисской, Ильинской, Кожевниковской, Костроминской, Нордвикской, Северо-Суодемской, Улаханской и Чайдахской площадях. Рассолы имеют хлоридный натриевый состав с общей минерализацией, варьирующей в широком интервале 52,3–350 г/дм<sup>3</sup>. Химический тип рассолов с повышенным содержанием кальция и минерализацией 54,6–144,6 г/дм<sup>3</sup> выявлен в пределах водоносного комплекса рифейских отложений на Костроминской площади, венд-кембрийских на Северо-Суодемской и пермских на Улаханской и Северо-Суодемской площадях (рис. 2). В Анабаро-Хатангском бассейне развита криогенная толща мощностью до 600 м, в пределах которой широко распространены криопэги с величиной общей минерализации до 350 г/дм<sup>3</sup>. В целом исследуемый район характеризуется низкими геотермическими градиентами, в среднем 1,96°C/100 м [11].

В соответствии с результатами геологоразведочных работ прошлых лет и разработанной авторами данной статьи гидрогеологической стратификацией разреза в пределах АХБ выделены 11 водоносных комплексов (снизу вверх): 1) рифейский, 2) венд-кембрийский, 3) девонский, 4) каменноугольный, 5) пермский, 6) триасовый,

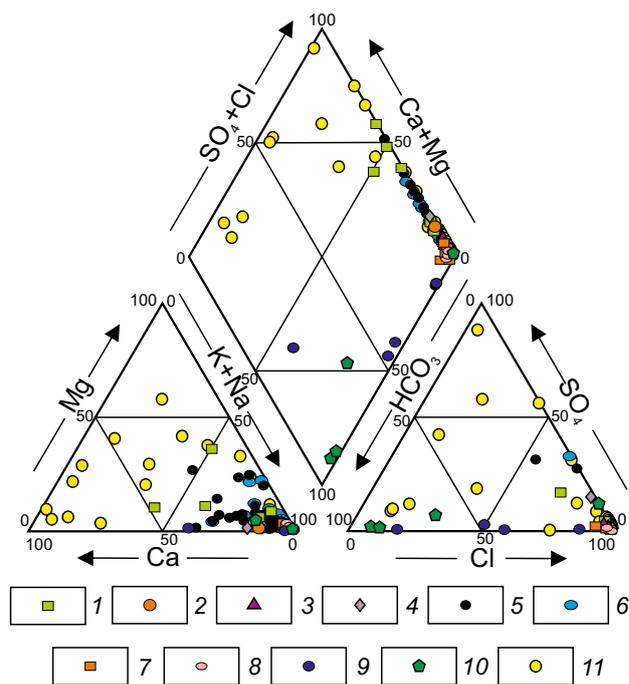


Рис. 2. Диаграмма Пайпера состава подземных вод Анабаро-Хатангского бассейна:

гидрогеологические комплексы: 1 – рифейский, 2 – венд-кембрийский, 3 – девонский, 4 – каменноугольный, 5 – пермский, 6 – триасовый, 7 – нижне-среднеюрский, 8 – верхнеюрский, 9 – неокомский, 10 – апт-альб-сеноманский, 11 – четвертичных аллювиальных и ледниковых отложений

7) нижне-среднеюрский, 8) верхнеюрский, 9) неокомский, 10) апт-альб-сеноманский, 11) водоносный комплекс четвертичных аллювиальных и ледниковых отложений.

Водоносный комплекс четвертичных аллювиальных и ледниковых отложений отличается широким разнообразием химического состава подземных вод (от гидрокарбонатного кальциевого до хлоридного натриевого), а также большим диапазоном изменения общей минерализации от 0,1 до 333 г/дм<sup>3</sup>.

В связи с наличием в бассейне мощной (до 500–600 м) криогенной толщи верхние водоносные горизонты в меловых, юрских и верхней части триасовых отложений заморожены. Апт-альб-сеноманский водоносный комплекс представлен подземными водами гидрокарбонатного натриевого состава, реже – хлоридного натриевого с минерализацией 0,5–3,0 г/дм<sup>3</sup>. Водорастворённые газы в основном метанового состава. Воды неокомского водоносного комплекса имеют

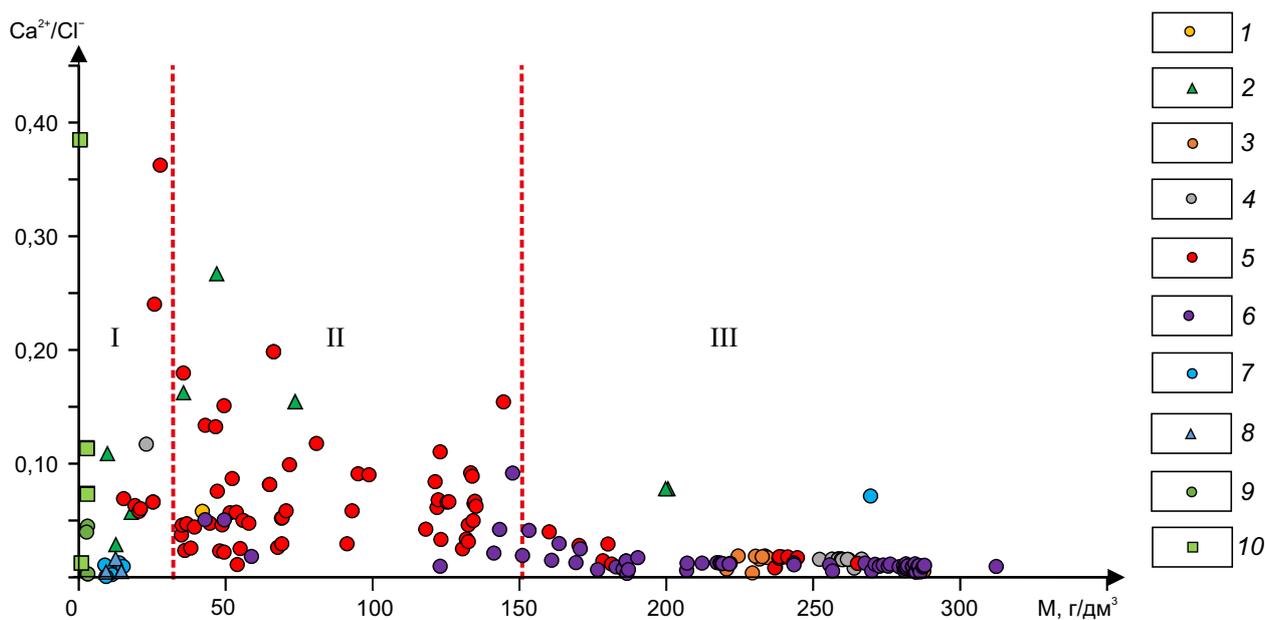


Рис. 3. Зависимость  $\text{Ca}/\text{Cl}$  от величины общей минерализации подземных вод Анабаро-Хатангского бассейна:

водоносные комплексы: 1 – рифейский, 2 – венд-кембрийский, 3 – девонский, 4 – каменноугольный, 5 – пермский, 6 – триасовый, 7 – нижне-среднеюрский, 8 – верхнеюрский, 9 – неокомский, 10 – апт-альб-сеноманский; генетические типы: I – древних инфильтрационных вод, II – рассолов смешанных с высокометаморфизованными, III – рассолов выщелачивания каменной соли

хлоридный натриевый, реже хлоридно-гидрокарбонатный натриевый, гидрокарбонатно-хлоридный натриевый и гидрокарбонатный кальциево-натриевый составы. Общая минерализация варьирует в пределах 2,7–8,7 г/дм<sup>3</sup>. Воды верхнеюрского водоносного комплекса хлоридные и гидрокарбонатно-хлоридные натриевые метановые с минерализацией от 7 до 16 г/дм<sup>3</sup>. Подземные воды нижне-среднеюрского водоносного комплекса были изучены на Нордвикской площади. Они хлоридные натриевые с минерализацией до 305 г/дм<sup>3</sup>. На расположенной восточнее Рассохинской площади в пределах Енисей-Хатангского регионального прогиба воды хлоридные натриевые с довольно низкой минерализацией от 8 до 15 г/дм<sup>3</sup>. Многочисленными скважинами, пройденными в непосредственной близости от соляных штоков, в песчаниках и алевролитах триасового водоносного комплекса на глубинах 70–80 м вскрыты порово-трещинно-пластовые и жильные скопления рассолов хлоридного натриевого состава с минерализацией до 312 г/дм<sup>3</sup>.

В пермских отложениях развиты главным образом порово-трещинно-пластовые скопления

солёных вод и рассолов хлоридного натриевого состава. В отдельных пробах установлены воды хлоридного натриево-кальциевого и гидрокарбонатно-хлоридного натриевого состава. Водоносность пермских отложений изучена на Нордвикской, Ильинской, Чайдахской и других антиклинальных структурах, в разной степени осложнённых соляной тектоникой. В их пределах установлено наличие рассолов в основном хлоридного натриевого и натриево-кальциевого составов с минерализацией от 52 до 135 г/дм<sup>3</sup>, величина  $\text{Ca}/\text{Cl}$  составляет до 0,37 (рис. 3).

Хлоридные натриевые рассолы с минерализацией более 238 г/дм<sup>3</sup> установлены в пермских терригенных и угленосных отложениях на Нордвикском соляном куполе. В АХБ каменноугольные отложения изучены весьма слабо. Скважинами в районе Нордвикского соляного купола в известняках нижнего карбона вскрыты хлоридные натриевые рассолы с минерализацией до 237–266 г/дм<sup>3</sup>, на Южно-Суолемской площади минерализация ниже на математический порядок и не превышает 23,1 г/дм<sup>3</sup>. Отложения девонского водоносного комплекса изучены бурением

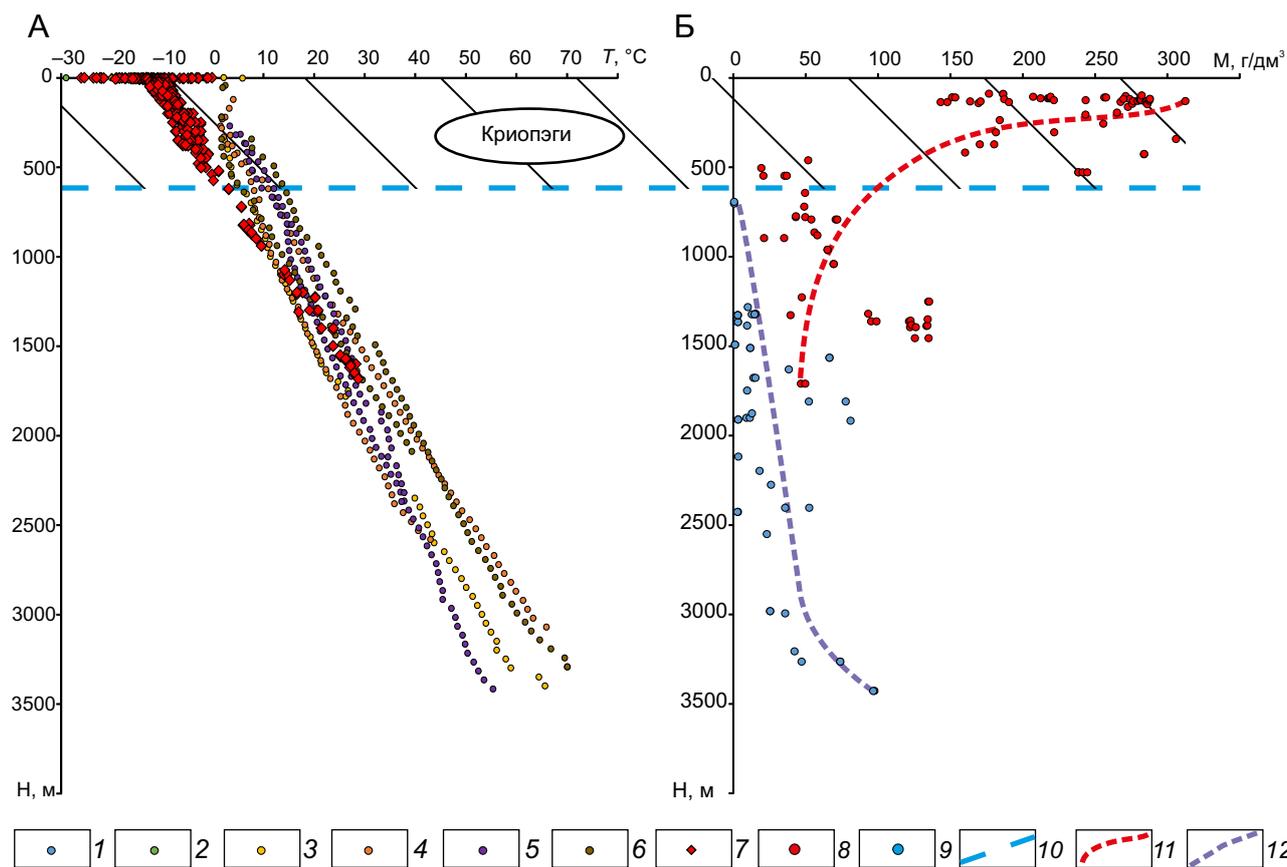


Рис. 4. Характер вертикальной геотермической (А) и гидрогеохимической (Б) зональности в пределах Анабаро-Хатангского бассейна:

1–6 – термометрия скважин: 1 – Ильинская № 111, № 38, Кожевниковская № 3, № 4, № 11, 2 – Нордвикская № 401, № 38, № 1, 3 – Чайдахская № 250, Южно-Тигянская № 1, 4 – Гурымисская № 2, 5 – Северо-Суолемская № 2, 6 – Улаханская № 2; 7 – точечные замеры пластовых температур; величина общей минерализации подземных вод и рассолов в пределах зон: 8 – распространения солянокупольных структур и 9 – отсутствия солей; 10 – нижняя граница распространения криогенной толщи; 11 – инверсионная вертикальная зональность в зонах распространения солянокупольных структур; 12 – прямая вертикальная зональность в зонах отсутствия солей

на Нордвикской и Кожевниковской площадях. По химическому составу воды хлоридные натриевые с величиной общей минерализации 220–287 г/дм<sup>3</sup>. В гидрогеохимическом отношении водоносный комплекс венд-кембрийских отложений изучен на Северо-Суолемской, Костроминской и Хастахской площадях. По химическому составу подземные воды хлоридные кальциево-натриевые, натриево-кальциевые и хлоридные натриевые с общей минерализацией до 10 г/дм<sup>3</sup> на Костроминской и 36,2–73,9 г/дм<sup>3</sup> на Северо-Суолемской площадях. На последней отмечаются высокие содержания йода 51,48 мг/дм<sup>3</sup>, брома 62,76 мг/дм<sup>3</sup> и Ca/Cl 0,15–0,27. В пределах АХБ водоносный комплекс рифейских отложений из-

учен на Хастахской площади. По химическому типу воды хлоридные натриевые, хлоридные кальциево-натриевые с величиной общей минерализации 42 г/дм<sup>3</sup>.

Ранее в обобщающей работе по нефтегазоносным бассейнам арктических районов Сибири было показано, что в Анабаро-Хатангском бассейне широко распространены подземные воды и рассолы нескольких генетических групп [23]: I – зоны активного водообмена, II – отложений с отсутствием галогенных пород, III – отложений с галогенными формациями и IV – районов распространения солянокупольных структур. В Анабаро-Хатангском бассейне установлено доминирование в разрезе двух генетических типов

рассолов: 1) выщелачивания солей и 2) седиментогенных. В отложениях апт-альб-сеноманского, неокомского и верхнеюрского комплексов развиты древние инфильтрационные воды. Наибольшим распространением в водоносных горизонтах ниже-среднеюрского, триасового, пермского и каменноугольного комплексов пользуются рассолы первого типа (преимущественно хлоридного натриевого состава) с величиной общей минерализации 50–350 г/дм<sup>3</sup>, генетически связанные с процессами растворения каменной соли в контактовых зонах солянокупольных структур. Седиментогенные рассолы хлоридного натриевого-кальциевого состава с минерализацией 55–145 г/дм<sup>3</sup> установлены в водоносных горизонтах венд-кембрийского и рифейского комплексов и являются результатом смешения глубокозалегающих высокометаморфизованных рассолов с более пресными древними инфильтрационными водами (см. рис. 3).

Рассматривая АХБ, нельзя не упомянуть о криогенной толще мощностью до 500–600 м и более, которая здесь по своему строению неоднородна, имеет в разрезе и по площади целый ряд переходов и изменений. Являясь региональным водоупором, она обуславливает криогенный напор содержащихся в них вод, что не может не сказаться на геотермическом режиме недр, залежах углеводородов и их разработке. В пределах Анабаро-Хатангского бассейна установлено наличие криопэггов, вкрапленных в криолитозону, которые создают ряд трудностей, например, при строительстве различных конструкций или бурении скважин.

Установлено, что в разрезе соляно-гипсовых и терригенных отложений пластовые температуры с глубиной монотонно растут (рис. 4). Выделяется три геотермических зоны. В первой круглогодично происходят сезонные колебания температур с положительных на отрицательные, что приводит к изменению фазового состояния свободной воды. Она включает в себя деятельный слой до 1 м и криогенной толщи до 20 м – граница годовой нулевой амплитуды с температурой до –12°C. Ниже по разрезу выделяется зона развития мёрзлых и охлаждённых пород. Она представляет собой породы, монолитно сцементированные льдом, с жилами, клиньями, линзами, гнёздами, прослоями и пластами ископаемых льдов. Часто встречаются пласты и целые пачки песчаников, насыщенных криопэгами. Эти пласты сильно охлаждённых, но всё же талых по-

род представляют псевдоталики. Они наблюдаются под котловинами крупных озёр и под руслами крупных рек. Во второй зоне можно выделить верхнюю (глубина залегания до 200 м) и нижнюю подзоны (примерно до 570 м). Верхняя подзона охарактеризована средним геотермическим градиентом равным 1,5°C/100 м и геотермической ступенью – 66,7 м/1°C. Именно здесь развиты крепкие рассолы юрских и триасовых отложений с общей минерализацией от 145 до 300 г/дм<sup>3</sup> (см. рис. 4). Нижняя подзона залегает на глубине нулевой температуры от 540 м в скв. К-402 на п-ве Юрюнг-Тумус до 570 м в скв. Р-1 на мысе Илья. Геотермический градиент и ступень равны 2,16°C/100 м и 46,3 м/1°C, соответственно. Подошва монолитно сцементированных льдом пород залегает значительно выше нулевой изотермы. В некоторых скважинах льдистость пород в керне фиксировалась до глубины 300 м, а на п-ве Юрюнг-Тумус вблизи соляного штока только до 80 м. В третьей зоне величины геотермического градиента могут достигать до 2,55°C/100 м.

#### **Палеогидрогеологические реконструкции.**

При проведении палеогидрогеологических исследований решалось две задачи. Первоначально была составлена схема периодизации гидрогеологической истории Анабаро-Хатангского бассейна с выделением гидрогеологических циклов и этапов. Затем были выполнены палеогидрогеохимические реконструкции. Результаты палеогидродинамического анализа в настоящей работе не освещены, поскольку составляют отдельный большой блок исследований.

В гидрогеологической истории исследуемого региона можно выделить 12 гидрогеологических циклов (рис. 5): архейско-карелийский (I); рифейско-нижневендский (II), верхневендско-силурийский (III), нижнедевонский (IV), среднедевонско-каменноугольный (V), пермско-нижне-оленёкский (VI), верхнеоленекский (VII); средне-триасовый (VIII), карнийско-нижнерэтский (IX), верхнерэтский (X), юрско-эоплейстоценовый (XI) и неоплейстоценово-голоценовый (XII). Дадим краткую характеристику каждого из них.

Архейско-карелийский цикл (I) связан с формированием отложений кристаллического фундамента и началом образования плитного комплекса, доминированием процессов инфильтрации атмосферных осадков. В начале раннего рифея произошла крупная трансгрессия, охватившая всю территорию исследования и ознаменовавшая начало нового рифейско-нижневендского гидрогеологи-



**Рис. 5. Периодизация гидрогеологической истории Анабаро-Хатангского бассейна:**

1–3 – обстановки осадконакопления: 1 – морская, 2 – континентальная, 3 – переходная; 4–5 – зоны: 4 – отсутствия отложений, 5 – размыва и несогласного залегания пластов; гидрогеологические этапы: 6 – элизионный, 7 – инфильтрационный; 8–20 – состав пород: 8 – породы кристаллического фундамента, 9 – песчаники, 10 – аргиллиты, 11 – переслаивание доломитов и аргиллитов, 12 – ангидриты, 13 – переслаивание доломитов и песчаников, 14 – известняки, 15 – глинистые известняки, 16 – соленосная толща, 17 – доломиты, 18 – туфы, 19 – переслаивание аргиллитов и алевролитов, 20 – четвертичные отложения, преимущественно пески, супеси, суглинки

ческого цикла (II). Шли процессы терригенно-карбонатной седиментации и захоронения сингенетических морских вод – элизионный этап. Отсутствие отложений нижнего венда следует связывать с инфильтрационным этапом.

Для верхневендско-силурийского цикла (III) характерен длительный элизионный этап с преимущественно карбонатной седиментацией, закончившейся ордовикско-силурийским перерывом в осадконакоплении. В позднесилурийское время исследуемый регион представлял собой возвышенную сушу, в пределах которой активно протекали процессы эрозии и денудации, преобладал инфильтрационный водообмен, повсеместно захоранивались пресные метеогенные воды гидрокарбонатного кальциевого состава. Суша была окаймлена с севера и запада мелководным шельфом, где формировались карбонатные (известняки) и карбонатно-глинистые породы и протекали процессы испарения морской воды. Подобные обстановки просуществовали до начала эмского века (IV), связанного с началом обширной трансгрессии, максимуму которой соответствует морская карбонатная толща юктинской свиты. Интенсивное соленакопление в Нордвикской части бассейна происходило в эмское-эйфельское время. В её пределах сформировался закрытый бассейн, рапа которого достигала величины общей минерализации до  $330 \text{ г/дм}^3$ , захоранивались воды хлоридного натриевого, хлоридного кальциевого и хлоридного магниевого составов (рис. 6, А). На юго-востоке АХБ преобладали обстановки низменной равнины. В процессе инфильтрации захоранивались воды с минерализацией  $0,5\text{--}2 \text{ г/дм}^3$  с преобладанием в составе ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ . На остальной территории существовал мелководный бассейн, где солёность вод достигала

ла  $30\text{--}35 \text{ г/дм}^3$  и в составе преобладали ионы  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ . В позднем живете начался регрессивный этап развития бассейна, солёность инфильтрационных вод не превышала  $2 \text{ г/дм}^3$ . С франского века (V) начался новый трансгрессивный этап, в течение которого морской бассейн значительно расширился. В наиболее открытых его частях накапливались карбонатные породы с соленоватыми водами с минерализацией  $5\text{--}15 \text{ г/дм}^3$  и преобладанием в составе ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ . В фамене регрессия охватила все бассейны севера Сибири, обстановки стали более мелководными, Нордвикский район представлял собой карбонатную платформу, в пределах которой формировались известняки.

В пермско-нижнеолёнокском цикле (VI) выделяется пермский элизионный этап, проходивший в условиях морского терригенного осадконакопления. В индское время исследуемая территория представляла собой в основном мелкое море, ограниченное с юга прибрежно-морской равниной и аллювиально-озёрной равниной на юго-востоке. Практически повсеместно захоранивались сингенетические соленоватые воды с минерализацией  $5\text{--}15 \text{ г/дм}^3$  и преобладанием в составе ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  при повышенном содержании ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . В середине оленёкского века заканчивается пермско-нижнеолёнокский цикл и начинается верхнеолёнокский (VII), когда на юго-востоке АХБ протекают процессы терригенного осадконакопления. Установлен перерыв на границе оленёкского и анизийского веков [17].

В среднем триасе (VIII) район исследования испытывал постепенный переход от морских условий седиментогенеза к континентальным (см. рис. 6, Б). В анизийско-ландинское время в северной части АХБ располагался мелководный бассейн и захоранивались сингенетические соленоватые воды с минерализацией  $5\text{--}15 \text{ г/дм}^3$  с преобладанием в составе ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  при повышенном содержании ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . Центральные районы характеризовались обстановками переходного осадконакопления, где захоранивались соленоватые воды с минерализацией  $2\text{--}5 \text{ г/дм}^3$  с преобладанием в составе ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  при повышенном содержании  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ . В верхнем триасе можно выделить два гидрогеологических цикла. Карнийско-нижнерэтский (IX) характеризуется регрессией морского бассейна, которая привела к перерыву в осадконакоплении в период с середины нория до середины рэта и преобладанием инфильтрационных процессов. Верхнерэтский (X) с одновременным протеканием

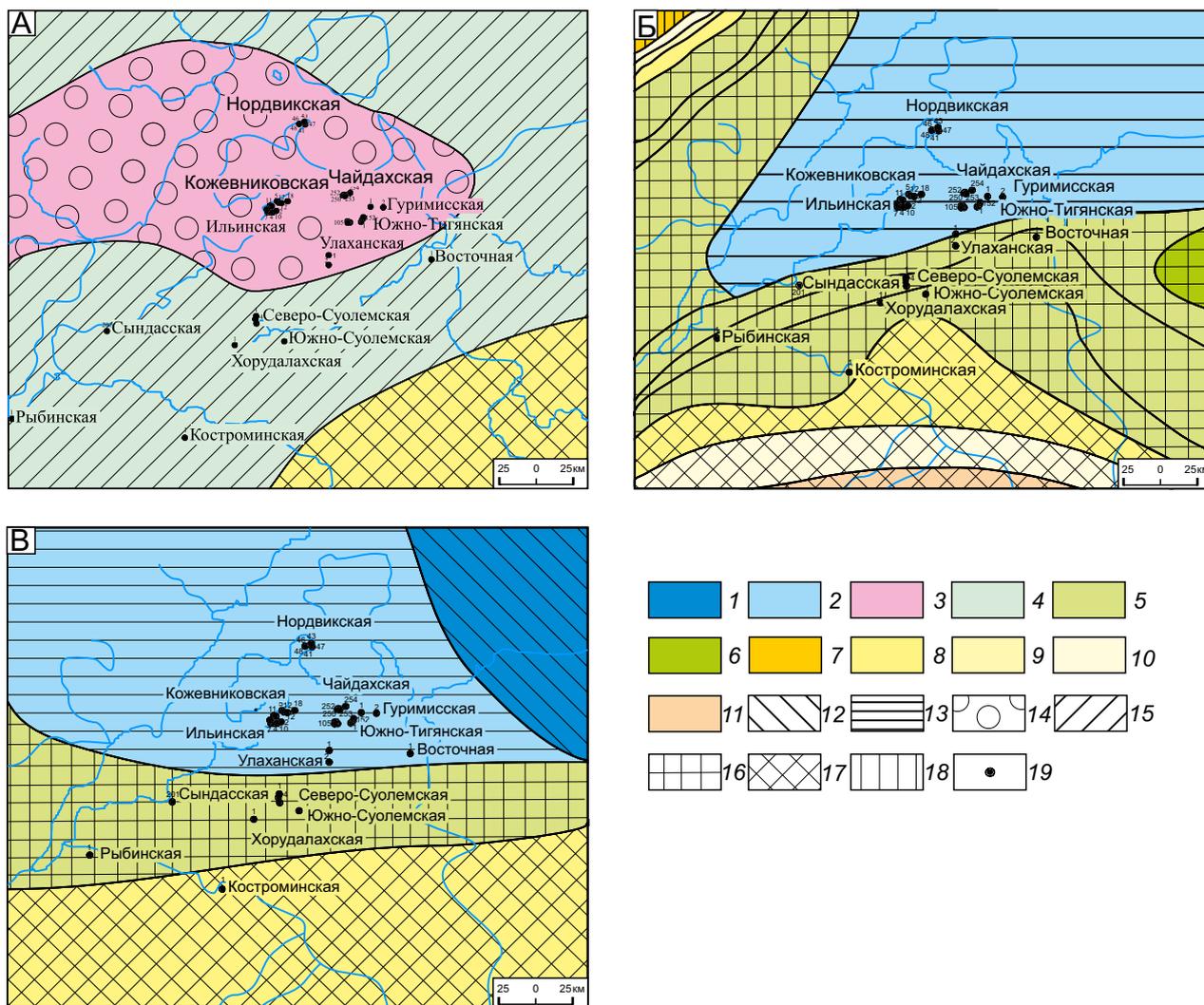


Рис. 6. Палеогидрогеохимическая карта на: (А) эмское-эйфельское (ранний-средний девон), (Б) анизийское-ладинское (средний триас) и (В) геттанг-келловейское (ранняя и средняя юра) время. Палеогеографическая основа по материалам ИНГГ СО РАН, 2011:

палеогеографические области: 1–4 – области морского осадконакопления: 1 – море, мелкая часть шельфа и прибрежная зона (50–100 м), 2 – море мелкое, островная часть шельфа (0–50 м), 3 – замкнутый бассейн, лагуна, прибрежная себха, солончак или солёное озеро, 4 – замкнутый или полузамкнутый внутришельфовый бассейн; 5–6 – области переходного осадконакопления: 5 – прибрежно-морская равнина (0–50 м), 6 – прибрежное мелководье (0–20 м); 7–11 – области континентального осадконакопления: 7 – горы низкие (500–700 м), 8 – аллювиально-озёрная равнина (20–100 м), 9 – равнина холмистая (100–200 м), 10 – равнина возвышенная денудационная (200–300 м), 11 – денудационное плато (300–500 м); 12–18 – палеогидрогеохимические зоны формирования: 12 – солёные (талассогенные) воды с минерализацией 15–20 г/дм<sup>3</sup> с преобладанием в составе ионов Mg<sup>2+</sup>, 13 – солоноватые воды с минерализацией 5–15 г/дм<sup>3</sup> с преобладанием в составе ионов Cl<sup>-</sup> и Na<sup>+</sup> при повышенном содержании ионов Mg<sup>2+</sup> и Ca<sup>2+</sup>, 14 – рассольные воды с минерализацией 50–400 г/дм<sup>3</sup>, с преобладанием в составе ионов Cl<sup>-</sup> и Na<sup>+</sup>, 15 – солёные воды с минерализацией 35–50 г/дм<sup>3</sup> с преобладанием в составе ионов Cl<sup>-</sup> и Na<sup>+</sup>, 16 – солоноватые воды с минерализацией 2–5 г/дм<sup>3</sup> с преобладанием в составе ионов Cl<sup>-</sup> и Na<sup>+</sup>, при повышенном содержании HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и Ca<sup>2+</sup>, 17 – пресные и солоноватые инфильтрационные воды с минерализацией 0,5–2 г/дм<sup>3</sup> с преобладанием в составе ионов HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и Ca<sup>2+</sup> при повышенном содержании Cl<sup>-</sup> и Na<sup>+</sup>, 18 – пресные инфильтрационные воды с минерализацией до 0,5 г/дм<sup>3</sup> с преобладанием ионов HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и Ca<sup>2+</sup>; 19 – скважины

элизионных и инфильтрационных процессов в прибрежно-морских условиях и захоронением солоноватых вод с минерализацией 2–5 г/дм<sup>3</sup>, закончившийся перерывом в осадконакоплении.

На протяжении всей юры и раннего неокома (XI) на территории Анабаро-Хатангского бассейна (см. рис. 6, В) проходило спокойное терригенное морское осадконакопление [5, 8]. В геттанге и синемюре север территории исследования представлял собой прибрежно-морскую равнину, в пределах которой захоранивались солоноватые воды с минерализацией 2–5 г/дм<sup>3</sup> преимущественно хлоридного натриевого состава с высоким содержанием кальция и гидрокарбонат-иона [5, 16]. В центральной и южной частях формировались пресные и солоноватые инфильтрационные воды с минерализацией 0,5–2 г/дм<sup>3</sup> с преобладанием в составе ионов Ca<sup>2+</sup> и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> при повышенном содержании Cl<sup>-</sup> и Na<sup>+</sup>. В плинсбахское время на большей части территории захоранивались солёные воды с минерализацией 5–15 г/дм<sup>3</sup> преимущественно хлоридного натриевого состава. В тоаре на территории исследования мелководное море затопило денудационную равнину, теперь его ограничивало лишь денудационное плато, расположенное в пределах современного Таймыра. Повсеместно захоранивались воды с минерализацией 5–15 г/дм<sup>3</sup>. В байосе совместно с осадками захоранивались солёные таласогенные воды с минерализацией 5–15 г/дм<sup>3</sup>. В западной части территории захоранивались таласогенные хлоридные натриевые воды солёностью 15–20 г/дм<sup>3</sup>. Хатангское море обрамляли возвышенные части суши в виде денудационных равнин и плато. В батский век Анабаро-Хатангский бассейн представлял собой мелководно-морской бассейн, где совместно с отложениями захоранивались солоноватые воды с минерализацией 2–5 г/дм<sup>3</sup>.

В позднем готериве началась очередная крупная регрессия, сопровождаемая континентальными условиями осадконакопления практически на всей территории исследования в период с баррема по ранний сеноман [9]. До неоплейстоцена Анабаро-Хатангский бассейн представлял собой денудационное плато – инфильтрационный этап. Начиная с неоплейстоцена (XII) район подвергался воздействию многочисленных оледенений.

Как показали результаты палеогеохимических реконструкций изучаемого района, в течение всего геологического времени подземные воды претерпевали различные и сложные изменения, но современный химизм подземных вод во мно-

гом носит унаследованный характер. На территории исследования установлены различные обстановки осадконакопления и разные генетические типы подземных вод.

В понимании особенностей геохимии современных рассолов АХБ во многом поможет изучение гидрогеохимических процессов, протекающих при соленакоплении в аридном и семиаридном климате. Схожие условия седиментации в настоящее время наблюдаются в себхах Ближнего Востока. Результаты обобщения гидрохимии поверхностных вод и рассолов себх Абу-Даби, Дждда, Джизан, Бардавил [22, 25–27, 29] позволили выявить характер изменения содержания основных ионов в зависимости от величины их общей минерализации. Содержание магния в водах увеличивается с ростом их минерализации. В себхах Бардавил и Джизан с ростом минерализации уменьшается содержание гидрокарбонат-иона (от 0,35 до 0,07 г/дм<sup>3</sup>) и кальция (от 28 до 0,8 г/дм<sup>3</sup>), в то время как в себхе Дждда отмечается рост гидрокарбонат-иона (от 0,03 до 0,79 г/дм<sup>3</sup>) и снижение содержания кальция (от 1,7 до 0,1 г/дм<sup>3</sup>). Также отмечен закономерный рост значений коэффициента rNa/rCl с ростом минерализации (от 0,29 до 1,05) до стадии садки галита (300–320 г/дм<sup>3</sup>) и дальнейшее его снижение (до 0,18) в водах с преобладанием иона магния на стадиях садки сильвина, карналлита и бишофита в АХБ, себхах Бардавил, Абу-Даби (рис. 7).

В водах и рассолах себх бассейнов Джизан и Дждда значения коэффициента rNa/rCl значительно ниже значений стадий садки кальцита, доломита, гипса и галита. В целом значения rNa/rCl коэффициента во всех типах вод изменяются от 0,70 до 0,95 до стадии садки гипса, затем увеличиваются до стадии садки галита и при достижении минерализации 300–320 г/дм<sup>3</sup> уменьшаются до 0,2 (см. рис. 6). За счёт процессов солнечного концентрирования в рассолах себхи Бардавил преобладают ионы хлора и натрия, что сопровождается осаждением галита. В себхах Джизан, Абу-Даби и Дждда начинает выпадать из раствора сильвин, а в растворе преобладают ионы хлора и магния. Химический состав и распределение основных генетических коэффициентов в подземных рассолах Анабаро-Хатангского бассейна во многом схожи с современными условиями себх Дждда и Бардавил, где отлагаются гипсовые строматолиты и галитовые шевроны [26, 29].

Резюмируя вышесказанное, следует отметить, что палеогеографические обстановки во многом

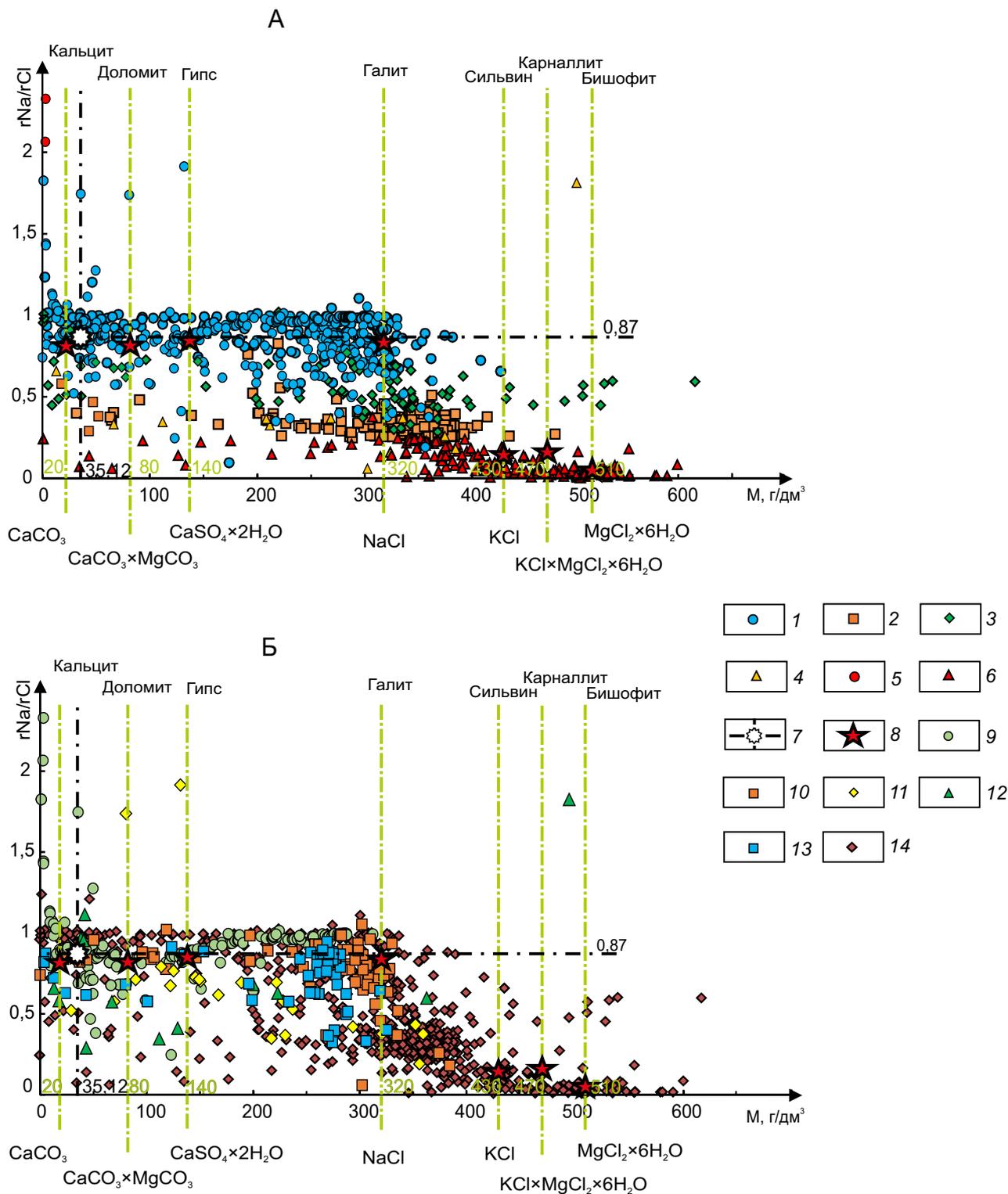


Рис. 7. Изменение значений  $rNa/rCl$  коэффициента с ростом общей минерализации подземных вод и рассолов в зависимости от химического типа вод (А) и гидрогеохимического эталона (Б):

А: 1 – Cl Na, 2 – Cl Ca-Na, 3 – Cl Na-Ca, 4 – Cl Mg, 5 –  $HCO_3$  Na, 6 – Cl Ca, 7 – морская вода; 8 –  $rNa/rCl$  коэффициент стадий садки;  
 Б: 9 – Анабаро-Хатангский бассейн, 10 – себха Абу-Даби, 11 – бассейн Джедда, 12 – бассейн Джизан, 13 – себха Бардавилль, 14 – Сибирская платформа

определяют химизм сингенетических вод. Морские воды уже на начальных стадиях захоронения претерпевают значительные изменения химизма, скорость которых зависит от состава осадков, обогащённости осадка органическим веществом, гидродинамического режима и скорости седиментации. Механизм уплотнения осадков запускается на иловой стадии, как только иловые осадки оказываются гидродинамически изолированными от вод исходного морского бассейна. По мере развития осадочного бассейна и возрастания геостатических нагрузок, осадки уплотняются и из них отжимаются сингенетические пластовые воды, которые затем поступают в песчаные пласты. Элизионные воды глин в коллекторах смешиваются с исходными седиментационными. На больших глубинах (от 3 км и более) происходит также выжимание связанной воды пониженной минерализации за счёт процессов термодегидратации глинистых минералов [4]. Детальный анализ эволюции Анабаро-Хатангского бассейна позволил реконструировать его гидрогеологическую историю и выделить 12 гидрогеологических циклов. Юрско-эоплейстоценовый цикл является наиболее продолжительным. Он характеризовался доминированием континентальных условий седиментации с продолжительным инфильтрационным этапом (от нижнего мела до неоплейстоцена). При этом соли, сформированные во время нижнедевонского гидрогеологического цикла, оказывают ключевое влияние на химический состав и вертикальную гидрогеохимическую зональность районов распространения солянокупольных структур в пределах АХБ.

*Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331–2019–0025 «Геохимия, генезис и механизмы формирования состава подземных вод арктических районов осадочных бассейнов Сибири» и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18–05–70074 «Ресурсы Арктики».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басков Е. А. Основы палеогидрогеологии рудных месторождений. – Л.: Недра, 1983. – 263 с.
2. Валяшко М. Г. Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 403 с.
3. Карцев А. А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений: учебное пособие для вузов. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 353 с.
4. Карцев А. А., Вагин С. Ю., Басков Е. А. Палеогидрогеология. – М.: Недра, 1969. – 150 с.
5. Кох А. А. Палеогидрогеологические реконструкции юрско-меловых отложений западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба // Отечественная геология. – 2014. – № 2. – С. 77–86.
6. Московский Г. А., Гончаренко О. П., Свидзинский С. А. Основные черты гидрохимии пермского галогенеза Прикаспия // Известия Саратовского университета. – 2011. – Т. 11, № 1. – С. 69–75.
7. Никаноров А. М., Волобуев Г. П., Барцев О. Б. Палеогидрогеологические реконструкции нефтегазоносных бассейнов. – М.: Недра, 1975. – 192 с.
8. Никитенко Б. Л., Князев В. Г., Лебедева Н. К. и др. Проблемы стратиграфии оксфорда и кимериджа на севере Средней Сибири (разрез полуострова Нордвик) // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 9. – С. 1222–1241.
9. Никитенко Б. Л., Шурыгин Б. Н., Князев В. Г. и др. Стратиграфия юры и мела Анабарского района (Арктическая Сибирь, побережье моря Лаптевых) и бореальный зональный стандарт // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 8. – С. 1047–1082.
10. Новиков Д. А. Особенности состава рассолов Анабаро-Ленской зоны // «Седьмые Саксовские чтения»: материалы научной сессии, посвященной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР В. Н. Сакса. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН. – 2011. – Т. I. – С. 209–213.
11. Новиков Д. А., Кох А. А., Садыкова Я. В., Сухорукова А. Ф. Гидрогеология и геотермия докембрийских и фанерозойских отложений Анабаро-Ленского региона // Материалы научно-практической конференции «Нефтегазогеологический прогноз и перспективы развития нефтегазового комплекса Востока России». – СПб.: ФГУП «ВНИГРИ», 2013. – С. 224–229.
12. Садыкова Я. В., Новиков Д. А. Палеогидрогеологические реконструкции верхнеюрских отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья // Нефть и газ. – 2010. – № 1. – С. 19–28.
13. Садыкова Я. В. О факторах формирования состава подземных вод ниже-среднеюрских отложений восточной части Енисей-Хатангского регионального прогиба и Анабаро-Хатангской седловины // ГЕО-Сибирь-2011. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: сборник материалов VII между-

- народного научного конгресса. – Новосибирск, 2011. – С. 102–106.
14. Садыкова Я. В. Палеогидрогеохимические реконструкции нефтегазоносных отложений полуострова Гыдан // Отечественная геология. – 2016. – № 1. – С. 16–24.
  15. Садыкова Я. В., Дульцева М. Г. Роль палеогидрогеохимических факторов в формировании состава подземных вод нефтегазоносных отложений северо-восточной части Большехетской мегасинеклизы // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44, № 2. – С. 168–181.
  16. Садыкова Я. В. Периодизация гидрогеологической истории Анабаро-Хатангской, Лено-Анабарской и Лаптевской нефтегазоносных областей // Интерэкспо Гео-Сибирь. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: сборник материалов XIII международного научного конгресса. – Новосибирск, 2017. – Т. 2, № 1. – С. 171–176.
  17. Сакс В. Н., Грамберг Н. С., Ронкина З. З., Аглонова Э. Н. Мезозойские отложения Хатангской впадины. – Л.: Гостоптехиздат, 1959. – 226 с.
  18. Соколовский Л. Г., Поляков В. А., Тимохин В. Г., Алибекова С. В. Оценка условий формирования и защищенности от техногенного загрязнения подземных вод Восточно-Предкавказского артезианского бассейна // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 7. – С. 24–31.
  19. Чирвинский П. Н. Палеогидрогеология // Проблемы современной геологии. – 1933. – Т. 3, № 8. – С. 107–122.
  20. Шестов И. Н., Тюрина И. М., Шувалов В. М. Влияние палеогидрогеологических условий на формирование нефтегазоносных месторождений Пермского Прикамья // Вестник Пермского университета. – 2008. – № 10. – С. 16–19.
  21. Hendry J. M., Barbour S. L., Novakowski K., Wassenaar L. I. Paleohydrogeology of the Cretaceous sediments of the Williston Basin using stable isotopes of water // Water resources research. – 2013. – № 49. – P. 4580–4592.
  22. Mohammed H. B., Mahmoud A. A. Composition and origin of the sabkha brines, and their environmental impact on infrastructure in Jizan area, Red Sea Coast, Saudi Arabia // Environ Earth Sci. – 2016. – Vol. 75, № 105. – P. 17.
  23. Novikov D. A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – Vol. 44, № 5. – P. 780–788.
  24. Novikov D. A., Chernykh A. V., Dultsev F. F. Paleohydrogeochemistry of the Upper Jurassic Deposits of the Arctic Regions of the West Siberian Megabasin // Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Applied Physics, Power and Material Science (Secunderabad, Telangana, India, 5–6 December 2018). – 2019. – Vol. 1172. № 012094.
  25. Rosenthal E., Flexer A., Moller P. The paleoenvironment and the evolution of brines in the Jordan-Dead Sea transform and in adjoining areas // International Journal of Earth Sciences. – 2006. – № 95. – P. 725–740.
  26. Rushdi J. T., Mahmoud A. A. Hydrochemistry, evolution, and origin of brines in supratidal saline pans, south Jeddah, Red Sea coast, Saudi Arabia // Arab J Geosci. – 2015. – № 8. – P. 8835–8851.
  27. Thomas F. K., Warren W. W., Ward E. S. Distinguishing seawater from geologic brine in saline coastal groundwater using radium-226 an example from the Sabkha of the UAE // Chemical Geology. – 2014. – № 371. – P. 1–8.
  28. Veizer J., Prokoph A. Temperatures and oxygen isotopic composition of Phanerozoic oceans // Earth-Science Reviews. – 2015. – № 146. – P. 92–104.
  29. Yitzhak L. The origin and evolution of brine in coastal sabkhas, Northern Sinai // Journal of Sedimentary Petrology. – 1997. – Vol. 47, № 1. – P. 451–462.
  30. Zak K., Kostak M., Man O. et al. Comparison of carbonate C and O stable isotope records across the Jurassic/Cretaceous boundary in the Tethyan and Boreal Realms // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2011. – № 299. – P. 83–96.

## REFERENCES

1. *Baskov E. A.* Osnovy paleogidrogeologii rudnykh mesto-rozhdenii [Basics of paleohydrogeology of ore deposits]. Leningrad, Nedra Publ. 1983. 263 p.
2. *Valyashko M. G.* Geokhimicheskie zakonomernosti formirovaniya mestorozhdenii kaliinykh solei [Geochemical regularities of formation of potash salt deposits]. Moscow, Izdatel'stvo MGU Publ. 1962. 403 p.
3. *Kartsev A. A.* Hidrogeologiya neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii: uchebnoe posobie dlya vuzov [Hydrogeology of oil and gas fields: textbook for universities]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ. 1963. 353 p.
4. *Kartsev A. A., Vagin S. Yu., Baskov E. A.* Paleogidrogeologiya [Paleohydrogeology]. Moscow, Nedra Publ. 1969. 150 p.
5. *Kokh A. A.* Paleogidrogeologicheskie rekonstruktsii yursko-melovykh otlozhenii zapadnoi chasti Enisei-Khatangskogo regional'nogo progiba [Paleohydrogeological reconstructions of Jurassic-Cretaceous deposits in the Western part of the Yenisei-khatang regional trough]. Otechestvennaya geologiya. 2014. no. 2. P. 77–86
6. *Moskovskii G. A., Goncharenko O. P., Svidzinskii S. A.* Osnovnye cherty gidrokhimii permskogo galogeneza Prikaspiya [Main features of hydrochemistry of Permian halogenesis of the Caspian sea]. Izvestiya Saratovskogo universiteta. 2011. V. 11. no. 1. P. 69–75.
7. *Nikanorov A. M., Volobuev G. P., Bartsev O. B.* Paleogidrogeologicheskie rekonstruktsii neftegazonosnykh basseinov [Paleohydrogeological reconstructions of oil and gas basins]. Moscow, Nedra Publ. 1975. 192 p.
8. *Nikitenko B. L., Knyazev V. G., Lebedeva N. K., Peshchevitskaya E. B., Kutugin R. V.* Problemy stratigrafii oksforda i kimeridzha na severe Srednei Sibiri (razrez poluostrova Nordvik) [Problems of stratigraphy of Oxford and kimeridzha in the North of Central Siberia (section of the Nordvik Peninsula)]. Geologiya i geofizika. 2011. V. 52. no. 9. P. 1222–1241.
9. *Nikitenko B. L., Shurygin B. N., Knyazev V. G., Meledina S. V., Dzyuba O. S., Lebedeva N. K., Peshchevitskaya E. B., Glin-skikh L. A., Goryacheva A. A., Khafaeva S. N.* Stratigrafiya yury i mela Anabarskogo raiona (Arkticheskaya Sibir', poberezh'e morya Laptevnykh) i boreal'nyi zonal'nyi standart [Stratigraphy of the Jurassic and Cretaceous of the Anabar region (Arctic Siberia, Laptev sea coast) and boreal zonal standard]. Geologiya i geofizika. 2013. V. 54. no. 8. P. 1047–1082.
10. *Novikov D. A.* Osobennosti sostava rassolov Anabaro-Lenskoi zony [Features of the composition of brines of the Anabar-Lena zone]. Sed'mye Saksoskie chteniya: Materialy nauchnoi sessii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya chlena-korrespondenta AN SSSR V. N. Saksy. Novosibirsk, INGG SO RAN Publ. 2011. V. 1. P. 209–213.
11. *Novikov D. A., Kokh A. A., Sadykova Ya. V., Sukhorukova A. F.* Hidrogeologiya i geotermya dokembriiskikh i fanero-zoiskikh otlozhenii Anabaro-Lenskogo regiona [Hydrogeology and Geothermy of Precambrian and Phanerozoic deposits of the Anabar-Lena region]. Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii "Neftegazogeologicheskii prognoz i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa Vostoka Rossii". Sankt-Peterburg, FGUP VNIGRI Publ. 2013. P. 224–229.
12. *Sadykova Ya. V., Novikov D. A.* Paleogidrogeologicheskie rekonstruktsii verkhneyurskikh otlozhenii yuzhnykh raionov Ob'-Irtyskogo mezhdurech'ya [Paleohydrogeological reconstructions of upper Jurassic deposits in the southern regions of the Ob-Irtys interfluvium]. Neft' i gaz. 2010. no. 1. P. 19–28.
13. *Sadykova Ya. V.* O faktorakh formirovaniya sostava podzemnykh vod nizhne-sredneyurskikh otlozhenii vostochnoi chasti Enisei-Khatangskogo regional'nogo progiba i Anabaro-Khatangskoi sedloviny [On the factors of formation of groundwater composition of the lower-middle Jurassic sediments of the Eastern part of the Yenisei-khatang regional trough and the Anabar-khatang saddle]. GEO-Sibir'-2011. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Novye napravleniya i tekhnologiya poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: Sbornik materialov VII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa. Novosibirsk. 2011. P. 102–106.
14. *Sadykova Ya. V.* Paleogidrogeokhimicheskie rekonstruktsii neftegazonosnykh otlozhenii poluostrova Gydan [Paleohydrogeochemical reconstructions of oil and gas deposits of the Gydan Peninsula]. Otechestvennaya geologiya. 2016. no. 1. P. 16–24.
15. *Sadykova Ya. V., Dul'tseva M. G.* Rol' paleogidrogeokhimicheskikh faktorov v formirovanii sostava podzemnykh vod neftegazonosnykh otlozhenii severo-vostochnoi chasti Bol'shekhetskoi megasineklizy [The role of paleohydro-geochemical factors in the formation of groundwater composition of oil and gas deposits in the North-Eastern part of the Bolshikhetskaya megasineclise]. Vodnye Resursy. 2017. V. 44. no. 2. P. 168–181.

16. *Sadykova Ya. V.* Periodizatsiya gidrogeologicheskoi istorii Anabaro-Khatangskoi, Leno-Anabarskoi i Laptevskoi neftegazonosnykh oblastei [Periodization of the hydro-geological history of the Anabar-Khatang, Leno-Anabar and Laptev oil and gas fields]. *Interesno Geo-Sibir'. Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. Geokologiya: Sbornik materialov XIII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa. Novosibirsk. 2017. V. 2. no. 1. P. 171–176.*
17. *Saks V. N., Gramberg N. S., Ronkina Z. Z., Aplonova E. N.* Mezozoiskie otlozheniya Khatangskoi vpadiny [Mesozoic deposits of the khatang depression]. Leningrad, Gos-toptekhzdat Publ. 1959. 226 p.
18. *Sokolovskii L. G., Polyakov V. A., Timokhin V. G., Alibekova S. V.* Otsenka uslovii formirovaniya i zashchishchennosti ot tekhnogenogo zagryazneniya podzemnykh vod Vostochno-Predkavkazskogo artezianskogo basseina [Assessment of conditions for formation and protection from technogenic pollution of underground waters of the Eastern pre-Caucasian artesian basin]. *Razvedka i okhrana nedr. 2010. no. 7. P. 24–31.*
19. *Chirvinskii P. N.* Paleohidrogeologiya [Paleohydrogeology]. *Problemy sovremennoi geologii. 1933. V. 3. no. 8. P. 107–122.*
20. *Shestov I. N., Tyurina I. M., Shuvalov V. M.* Vliyaniye paleohidrogeologicheskikh uslovii na formirovaniye nefte-gazonosnykh mestorozhdenii Permskogo Pri-kam'ya [In-fluence of paleohydrogeological conditions on the formation of oil and gas fields in the Permian Kama region]. *Vestnik Permskogo universiteta. 2008. no. 10. P. 16–19.*
21. *Hendry J. M., Barbour S. L., Novakowski K., Wasse-naar L. I.* Paleohydrogeology of the Cretaceous sediments of the Williston Basin using stable isotopes of water. *Water resources research. 2013. no. 49. P. 4580–4592.*
22. *Mohammed H. B., Mahmoud A. A.* Composition and origin of the sabkha brines, and their environmen-tal impact on infrastructure in Jizan area, Red Sea Coast, Saudi Arabia. *Environ Earth Sci. 2016. V. 75. no. 105. 17 p.*
23. *Novikov D. A.* Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins. *Petroleum Exploration and Development. 2017. V. 44. no. 5. P. 780–788.*
24. *Novikov D. A., Chernykh A. V., Dultsev F. F.* Paleo-hydrogeochemistry of the Upper Jurassic Deposits of the Arctic Regions of the West Siberian Megabasin. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Applied Physics, Power and Mate-rial Science (Secunderabad, Telangana, India, 5–6 December 2018). 2019. V. 1172. no. 012094.*
25. *Rosenthal E., Flexer A., Moller P.* The paleoen-vironment and the evolution of brines in the Jordan-Dead Sea transform and in adjoining areas. *Inter-national Journal of Earth Sciences. 2006. no. 95. P. 725–740.*
26. *Rushdi J. T., Mahmoud A. A.* Hydrochemistry, evo-lution, and origin of brines in supratidal saline pans, south Jeddah, Red Sea coast, Saudi Arabia. *Arab J Geosci. 2015. no. 8. P. 8835–8851.*
27. *Thomas F. K., Warren W. W., Ward E. S.* Distinguish-ing seawater from geologic brine in saline coastal groundwater using radium-226 an example from the Sabkha of the UAE. *Chemical Geology. 2014. no. 371. P. 1–8.*
28. *Veizer J., Prokoph A.* Temperatures and oxygen isotopic composition of Phanerozoic oceans. *Earth-Science Reviews. 2015. no. 146. P.92–104.*
29. *Yitzhak L.* The origin and evolution of brine in coastal sabkhas, Northern Sinai. *Journal of Sedimentary Petrology. 1997. V. 47. no. 1. P. 451–462.*
30. *Zak K., Kostak M., Man O., Zakharov V. A., Rogov M. A., Pruner P., Rohovec J., Dzyuba O. S., Mazuch M.* Comprasion of carbonate C and O stable isotope records across the Jurassic/Cretaceous boundary in the Tethyan and Boreal Realms. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology. 2011. no. 299. P. 83–96.*