

УДК 553.983

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-2-88-97

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДАННЫХ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ СОСТАВА ПЛАСТОВОЙ ВОДЫ АЧИМОВСКОЙ СВИТЫ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Екатерина Сергеевна Казак¹✉, Анастасия Сергеевна Семанова²,
Никита Владимирович Морозов³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Kanigu@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-4427-3196>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; semanova-a@mail.ru

³ ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург, Россия; Morozov.NV@gazpromneft-ntc.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная на сегодняшний день проблема слабой достоверности результатов определения химического состава и минерализации пластовых вод, возникающая по техническим или методологическим причинам, что впоследствии ведет к появлению прогнозов насыщения с высокой степенью неопределенности при использовании некачественных данных при интерпретации ГИС. В данной работе предложен новый алгоритм пошагового геохимического контроля для фильтрации выборки данных химического состава пластовой воды ачимовского комплекса северной части Западной Сибири. Предложенный алгоритм включает в себя несколько последовательных шагов (проверка электронейтральности, определение типа воды по Сулину, контроль гидрохимических показателей), по прохождению которых получается отфильтрованная кондиционная выборка. В результате такого контроля данных проведенных анализов химического состава пластовой воды выявлено, что кондиционными и пригодными для дальнейшего использования данными являются только 8,1 % проб из 242. Эти пробы максимально по своему составу приближены к составу пластовой воды ачимовской толщи и могут в дальнейшем использоваться как эталонные пробы. Применение геохимического контроля показало свою эффективность в отсеивании некондиционных данных и получении корректных данных состава пластовых вод и их минерализации, что позволит повысить достоверность геофизических прогнозов. Предложены варианты решения проблемы путем изменения методических подходов и усовершенствования инструментальной базы лабораторий химического анализа воды.

Ключевые слова: геохимический контроль, пластовые воды, электронейтральность, Ямбрут, химический состав подземных вод

Для цитирования: Казак Е.С., Семанова А.С., Морозов Н.В. Геохимический контроль данных как инструмент повышения качества интерпретации химических анализов состава пластовой воды ачимовской свиты северной части Западной Сибири // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 2. С. 88–97.

GEOCHEMICAL DATA QUALITY CONTROL AS A TOOL FOR IMPROVING THE INTERPRETATION OF FORMATION WATER CHEMISTRY: A CASE STUDY OF THE ACHIMOV FORMATION, NORTHERN WEST SIBERIA

Ekaterina S. Kazak¹✉, Anastasiya S. Semanova², Nikita V. Morozov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Kanigu@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-4427-3196>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; semanova-a@mail.ru

³ Gazprom Neft STC LLC, Saint Petersburg, Russia; Morozov.NV@gazpromneft-ntc.ru

Abstract. The article addresses a pressing issue in modern hydrogeochemical research — the low reliability of results in determining the chemical composition and salinity of formation waters, which often arises due to technical or methodological errors. These inaccuracies subsequently lead to highly uncertain saturation forecasts when poor-quality data are used for geophysical log interpretation. In this work, a new step-by-step geochemical control algorithm (GCA) is proposed for filtering datasets of formation waters composition from the Achimov Formation in the northern part of Western Siberia. The proposed algorithm consists of several consecutive stages — verification of electroneutrality, determination of water type according to Sulina's classification, and control of hydrochemical parameters. As a result of passing these stages, a filtered and conditionally valid dataset is obtained. Based on the GCA of the analyzed formation-water chemistry data, it was found that only 8.1 % of 242 samples can be considered reliable and suitable for further interpretation. These samples most closely reflect the true composition of the Achimov Formation waters and can be used as reference data. The application of GCA has proven effective in screening out invalid analyses and obtaining accurate values for formation water composition and salinity, which in turn increases the reliability of geophysical forecasts. Possible solutions to improve data quality are also proposed, including methodological adjustments and modernization of laboratory analytical equipment.

Keywords: geochemical control, formation waters, electrical neutrality, Yambrug, chemical composition of groundwater

For citation: Kazak E.S., Semanova A.S., Morozov N.V. Geochemical data quality control as a tool for improving the interpretation of formation water chemistry: a case study of the achimov formation, northern West Siberia. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 2: 88–97. (In Russ.).

Введение. Минерализации пластовых вод — важный параметр, который прежде всего используется для интерпретации данных ГИС, а также для подсчета запасов углеводородов. Достоверное определение данного параметра необходимо и актуально.

В процессе проведения поисково-разведочного бурения стандартные методы определения минерализации и химического состава пластовой воды часто приводят к получению недостоверных результатов по техническим или методологическим причинам. В большинстве случаев основная техническая причина такого низкого качества и слабой достоверности определения состава и минерализации проб пластовых вод связана с несоблюдением правил отбора проб [Balaram, Satyanarayanan, 2022].

Другая распространенная причина низкого качества данных — использование устаревших методических подходов для анализа проб пластовой воды [Smee et al., 2024]. Методы анализа, которые были предложены несколько десятилетий назад и используются в производственных лабораториях химического анализа воды (ХАЛ) и по сей день, не всегда позволяют получить результаты содержания компонентов с нужной точностью, так как они подразумевают, например, определение отдельных макрокомпонентов различными методами с разными ошибками определения, расчет суммарного содержания калия и натрия, а не прямое измерение их концентраций в воде по отдельности и т. п. Данные методы были прорывными для своего времени, однако сегодня с появлением новых методических и инструментальных подходов, позволяющих в меньшем объеме пробы на одном приборе получить результаты практически для всех макрокомпонентов, необходимо пересмотреть подходы к анализу проб пластовых вод.

В результате технических и методических причин определяемые параметры состава пластовых вод не характеризуют их состояние в пласте и не информативны для дальнейших задач. Их использование для интерпретации данных ГИС приведет к появлению прогнозов насыщения с высокой степенью неопределенности. Например, в среднем 30 % выделяемых интервалов при разведке получают статус неясного насыщения, в результате чего затраты на их испытания растут. Таким образом, возникает острая потребность в разработке нового подхода к интерпретации результатов химического состава и минерализации проб пластовой воды, что позволит точно определять степень кондиционности проб, и следовательно, приведет к уменьшению неопределенности петрофизической модели насыщения пород-коллекторов в категории «неясно».

В данной работе предложен новый алгоритм пошагового геохимического контроля (ГХК) для фильтрации выборки (242 пробы) данных химического состава пластовой воды по пластам-коллекторам ачимовского комплекса северной части Западной Сибири.

В литологическом плане ачимовская толща (Ач) характеризуется переслаиванием линз песчаников, аргиллитов и алевролитов. Ач приурочена к отложениям глубоководной обстановки осадконакопления, а именно к отложениям турбидитовых потоков. Минерализация пластовых вод водоносных горизонтов Ач изменяется от 5 до 14–20 г/дм³ [Бешенцев и др., 2019; Кошелев и др., 2014; Новиков, Лепокуров, 2005], в солевом составе доминируют хлориды натрия и калия при повышенном содержании гидрокарбонат-иона, сульфат-ион практически отсутствует.

Результаты использования ГХК помогут отсеять некондиционные данные и в дальнейшем получить корректные данные состава пластовых вод и их минерализацию, что позволит в первую очередь повысить достоверность геофизических прогнозов.

Методика исследования. Общий алгоритм геохимического контроля (ГХК) — фильтрация данных по химическому составу, минерализации и гидрохимическим показателям пластовых вод представлен на рис. 1. Данный алгоритм включает в себя три последовательных шага, по прохождению которых получается отфильтрованная кондиционная выборка.

На шаге 1 проверяется правильность выполнения химического анализа путем сравнения суммы катионов ($\sum K$, мг-экв/л) и суммы анионов ($\sum A$, мг-экв/л) и оценки степени электронейтральности раствора ($\mathcal{E}P$).

Если $\sum K = \sum A$, то электронейтральность раствора соблюдена, анализ выполнен корректно и такие результаты можно использовать для оценки гидрохимических показателей на шаге 2.

Если $\sum K \neq \sum A$, то необходимо оценить степень электронейтральности раствора ($\mathcal{E}P$, %) по формуле [Appelo, Postma, 2005]:

$$\mathcal{E}P = \frac{\sum K - \sum A}{\sum K + \sum A} \cdot 100.$$

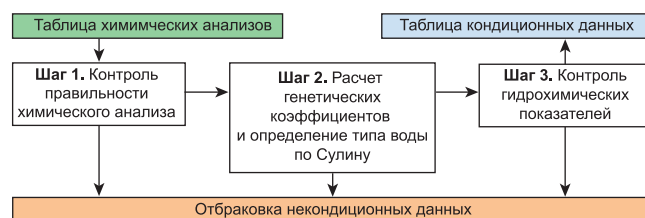


Рис. 1. Общий алгоритм гидрогеохимического контроля данных химического состава проб пластовых вод

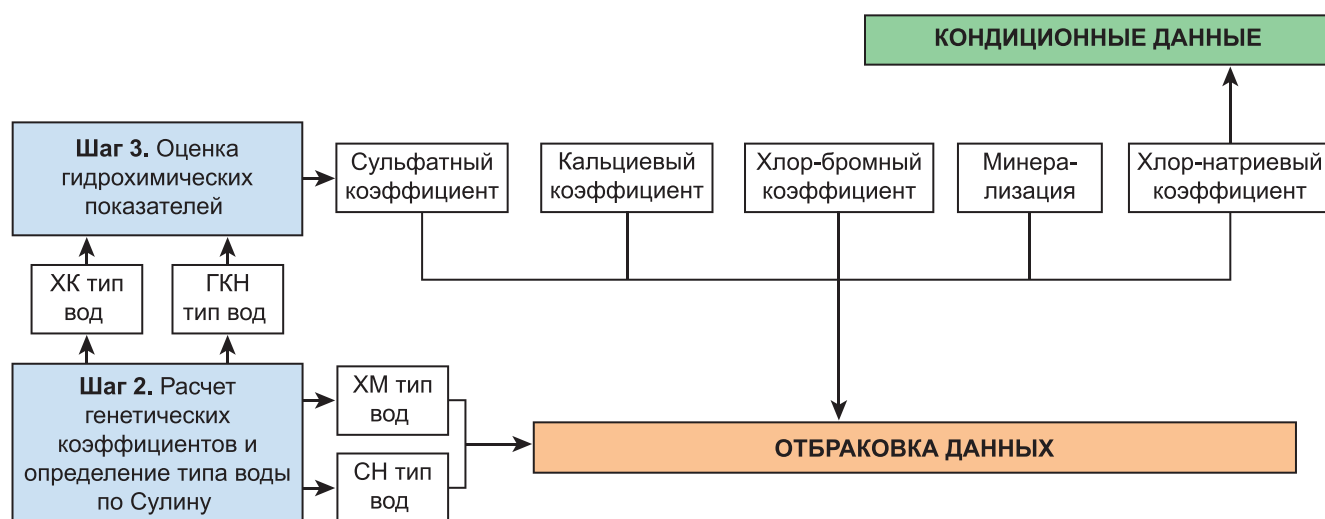


Рис. 2. Алгоритм геохимического контроля данных по типу воды по Сулину (шаг 2) и геохимическим показателям (шаг 3). ХК — хлоридно-кальциевый, ГКН — гидрокарбонатно-натриевый, ХМ — хлоридно-магниевый, СН — сульфатно-натриевый

В зависимости от величины суммарного содержания анионов в воде принимается разная степень допустимого расхождения между содержанием катионов и анионов (табл. 1).

Если ЭР выше указанных в табл. 1 соответствующих значений, то анализ выполнен с ошибкой, данные отбраковываются и не используются для дальнейшего анализа. Если ЭР ниже, то анализ считается выполненным корректно и такие результаты можно использовать для оценки генетических коэффициентов и геохимических показателей (шаг 2).

На шаге 2 производится фильтрация данных путем использования генетических коэффициентов и тип вод по Сулину (рис. 2).

Расчет генетических коэффициентов Сулина $\frac{r Na^+}{r Cl^-}$, $\frac{r Cl^- - r Na^+}{r Mg}$ и $\frac{r Na^+ - r Cl^-}{r SO_4}$ производится в мг-экв/л. Тип воды определяется по соотношению коэффициентов согласно табл. 2.

К сульфатно-натриевым (СН) и гидрокарбонатно-натриевым (ГКН) химическим типам относятся воды со значениями коэффициента $\frac{r Na^+ - r Cl^-}{r SO_4} <$ или >1 соответственно, и эти воды свойственны водам континентального генезиса. Однако, ГКН тип характерен и для глубоких частей разреза с гидрогеохимической инверсией.

Хлоридно-магниевый (ХМ) и хлоридно-кальциевый (ХК) типы характеризуются соответственно $<$ или >1 значениями коэффициента $\frac{r Cl^- - r Na^+}{r Mg}$, при этом считается, что преобладание в составе хлорида магния, специфической соли «морской» обстановки, свидетельствует о морском генезисе раствора. Увеличение >1 коэффициента $\frac{r Cl^- - r Na^+}{r Mg}$ и одновременное уменьшение коэффициента $\frac{r Na^+}{r Cl^-}$ до значений <1 свидетельствует о накоплении в водах хлорида

Таблица 1

Значения параметра электронейтральности раствора (ЭН, %) состава водных проб

№	Суммарное содержание анионов, мг-экв/л	Приемлемое значение параметра электрического баланса
1	0,0–3,0	Менее $\pm 0,2$ мг-экв/л
2	3,0–10,0	Менее $\pm 2\%$
3	10,0–800	5%

Таблица 2

Выделение генетических типов природных вод по классификации В.А. Сулина [Сулин, 1948]

Тип воды	$\frac{r Na^+}{r Cl^-}$	$\frac{r Na^+ - r Cl^-}{r SO_4}$	$\frac{r Cl^- - r Na^+}{r Mg}$	Характерная обстановка формирования вод
	Гидрокарбонатно-натриевый (ГКН)	>1	>1	
Сульфатно-натриевый (СН)	>1	<1	–	поверхностные воды; зоны свободного водообмена
Хлоридно-магниевый (ХМ)	<1	–	<1	морские воды
Хлоридно-кальциевый (ХК)	<1	–	>1	зоны затрудненного водообмена (глубокие)

кальция — специфической соли, свойственной глубоким метаморфизованным водам, в частности водам нефтяных месторождений [Сулин, 1948].

Таблица 3

Принятые валидные значения гидрогеохимических коэффициентов и минерализации для представленной выборки химических анализов состава пластовых вод Ач [Бешенцев, и др., 2019; Кошелев, Ли, Катаева, 2014; Новиков, Лепокуров, 2005]

Наименование	$rSO_4^{2-} \cdot 100 / rCl^-$	$rCa \cdot 100 / rNa$	Cl/Br	rNa / rCl	Минерализация
Пластовые воды Ач	<1,5	<6	<298	>1,1	20>M>6

Таким образом, определенное сочетание величин «генетических» коэффициентов В.А. Сулина позволяет выделить воды континентального происхождения и неглубокого залегания (ГКН и СН типы), воды молодых морских отложений (ХМ тип) и глубинные ХК воды.

Если в ходе анализа проб воды получается ХМ или СН тип вод, то такие пробы отбраковываются, так как представляют собой смесь глубинной пластовой воды и техногенной жидкости (рис. 2).

Если в ходе анализа проб воды получается ХК или ГКН тип вод (рис. 2), то такие пробы могут быть использованы для дальнейшей оценки гидрохимических показателей на шаге 3.

На шаге 3 оставшиеся данные фильтруются с помощью гидрохимических показателей путем расчета сульфатно-хлорного, кальций-натриевого, хлор-бромного, натрий-хлорного коэффициентов, минерализации, сравнивая полученные значения с типичными значениями для данных пластовых вод (например, полученным по данным опробования на этапе разведки) (рис. 2).

Сульфатно-хлорный коэффициент ($rSO_4^{2-} \cdot 100 / rCl^-$) рассчитывается как отношение концентрации сульфат-иона (мг-экв/л), умноженное на 100, к содержанию хлор-иона (мг-экв/л) и характеризует насыщенность вод сульфатами. В восстановительной обстановке зоны затрудненного водообмена, присущей пластовым водам нефтегазовых месторождений, этот коэффициент имеет более низкие значения по сравнению с поверхностными водами и подземными водами зоны активного водообмена. Повышение этого показателя может свидетельствовать о внедрении вод из внешних источников [Кошелев, Ли, Катаева, 2014]. Валидным для Ач пластовых вод считается значение коэффициента $rSO_4^{2-} \cdot 100 / rCl^-$ менее 1,5 (табл. 3, рис. 2).

Кальций-натриевый коэффициент ($rCa \cdot 100 / rNa$) [Кошелев и др., 2014] информативен при диагностике присутствия в составе попутных вод технических жидкостей, закачиваемых в скважины для промысловых целей. Рассчитывается как отношение концентрации кальция (мг-экв/л), умноженное на 100, к содержанию натрия (мг-экв/л) и характеризует насыщенность вод кальцием. Аномально высокие значения этого коэффициента связаны с воздействием технических растворов хлористого кальция.

Валидным для Ач пластовых вод считается значение $rCa \cdot 100 / rNa$ коэффициента менее 6 (табл. 3; рис. 2).

Хлор-бромный коэффициент (Cl/Br) — показатель гидрогеологической закрытости недр, отражающей условия сохранения залежей нефти и газа [Карцев, 1972; Карцев и др., 1986] и концентрирование морской воды за счет роста концентрации брома. В океанической воде этот коэффициент равен 293–320 [Хорн, 1972]. Вследствие более высокой растворимости природных бромидов, чем хлоридов, после садки галита бром продолжает накапливаться в солеродных бассейнах. С другой стороны, рассолы, образовавшиеся в результате растворения галоидных толщ, обеднены бромом, так как бром практически не осаждается вместе с хлоридами. Поэтому, в метаморфизованных водах, в которых растет относительная доля брома, по отношению к хлору, Cl/Br коэффициент меньше (до 80–100), чем для морской воды. В опресненных водах соотношение увеличивается до 2000. В вулканических водах бром практически отсутствует, поэтому данное отношение составляет для них 500–2000. Чем меньше будет коэффициент Cl/Br и более минерализованные воды, тем более вероятно формирование залежей нефти и газа. По данным Ю.И. Зытнера [Зытнер, Чибисова, 2013] наиболее благоприятными являются условия при значении Cl/Br коэффициента <100.

При Cl/Br < 298–300 воды являются пластовыми, их происхождение связано с древними бассейнами осадконакопления, зонами застойного водообмена (рис. 2). Если Cl/Br > 300, то существует вероятность дополнительного поступления хлора в пластовые воды за счет инфильтрации из внешних источников (например, технических растворов). Согласно данным результатов исследований [Кошелев и др., 2014], хлор-бромный коэффициент в пластовых водах Уренгойского НГКМ находится в пределах 150–250.

Натрий-хлорный коэффициент (rNa / rCl) называют коэффициентом метаморфизации [Сулин, 1948], в морской воде он равен 0,85 [Хорн, 1972]. В катионном составе вод Ач повсеместно преобладает ион натрия, величина $rNa / rCl > 1,1$ (табл. 3, рис. 2). По этому коэффициенту пластовые воды гидрокарбонатно-натриевого типа достаточно четко отличаются от других типов (хлоридно-кальциевых, сульфатно-натриевых, хлоридно-магниевых и вод смешения).

Минерализация (M) характеризует общие гидрогеохимические и гидрогеологические условия, зависящие от гидродинамики соответствующей части разреза бассейна [Карцев и др., 1986]. Воды, выносимые скважинами Ач, представлены часто смесями конденсационных, пластовых и техногенных вод в различных соотношениях. При сопоставлении составов таких типов вод наиболее существенные различия наблюдаются в значениях минерализации и концентраций ионов хлора, кальция, гидрокарбонатов, а также микрокомпонентов — йода, брома, стронция, бария. Минерализация пластовых

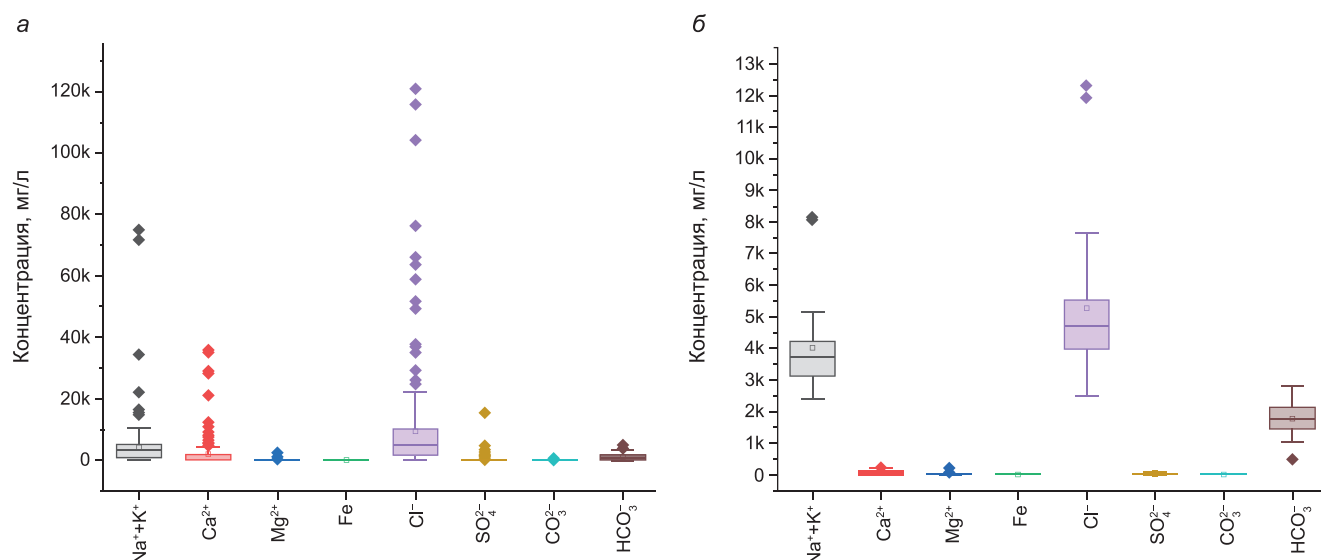


Рис. 3. Диапазоны содержаний макрокомпонентов в исследуемой выборке до (а) и после (б) фильтрации

вод водоносных горизонтов Ач изменяется от 5 до 14–20 г/дм³ (табл. 3; рис. 2) [Бешенцев и др., 2019; Кошелев и др., 2014; Новиков, Лепокуров, 2005], в солевом составе доминируют хлориды натрия и калия при повышенном содержании гидрокарбонат-иона.

Конденсационные воды Ач характеризуются низкими значениями минерализации (от 0,1 до 5–6 г/дм³) и зависят от влияния техногенных факторов на формирование их конечного состава. Минерализация незагрязненной ультрапресной конденсационной воды всегда менее 1 г/дм³.

Повышенные и высокие значения минерализации (более 20–40 г/дм³) присущи техногенным водам [Кошелев и др., 2014] — технологическим растворам и жидкостям на водной основе с минерализацией >40 г/дм³, используемых при бурении, капитальном ремонте и интенсификации скважин. В таких пробах присутствуют привнесенные соли (например, CaCl₂, NaCl, KCl и другие), что затрудняет идентификацию генетической принадлежности вод.

Результаты и их обсуждение. За период разведки и разработки Ач отложений накоплен достаточно большой массив данных химического состава пластовых вод с этапа разведки и в ходе эксплуатации. В частности, для Ямбургского месторождения это порядка 242 проб.

По данным химических анализов пробы пластовых вод ачимовской толщи характеризуются достаточно широким диапазоном содержания макрокомпонентов. Так, вариации изменения содержания хлор-иона составляет от около 120 г/л до менее 1 г/л (рис. 3, а), соответственно, минерализация тоже показывает большой диапазон изменений от около 200 до менее 1 г/л (рис. 3, а). Точки растягиваются по осям диаграммы Пайпера, показывая сильную вариацию по жесткости как (Ca+Mg), хлору, гидрокарбонат и сульфат ионам (рис. 4, а). Такой большой разброс указывает на неоднородность выборки в пределах одной толщи ачимовских отложений и указывает на различную природу вод в ней —

техногенная, пластовая, возможно кондиционная, и, конечно, смесей всех типов.

Для фильтрации выборки был использован алгоритм ГХК, представленный на рис. 1 и 2.

Проверка правильности результатов химического анализа показала (рис. 5, а), что условие электронейтральности ($\sum K = \sum A$) соблюдается только в двух анализах. Для остальных была оценена степень электронейтральности раствора (ЭР, %) по формуле (1). В результате в 35 пробах наблюдается избыток анионов, ЭР изменяется от 5 до 98,2%. Избыток катионов установлен в 69 пробах, ЭР изменяется от 5,17 до 84,17%. Таким образом, 103 пробы некондиционны и не могут быть использованы для дальнейшего анализа.

По соотношению генетических коэффициентов установлено, что к СН типу относится 4 пробы, к ХМ — 4 пробы (рис. 5, б). В 38 пробах установлен ГКН тип воды, в 91 пробе — ХК тип воды (рис. 5, а). Таким образом, 129 проб могут быть глубинными водами затрудненного водообмена или смешанными с техногенными водами и будут использованы на шаге 3 для фильтрации с помощью гидрогеохимических параметров.

Установлено, что исследуемая выборка характеризуется большим разбросом значений коэффициентов $rSO_4^{2-} \cdot 100/rCl$, $rCa \cdot 100/rNa$, rNa/rCl и минерализации даже в пределах одного пласта, что говорит о различной природе исследуемых вод (пластовая, техногенная, смесь и пр.).

Фильтрация с использованием сульфатно-хлорного коэффициента показала (рис. 6, а), что $rSO_4^{2-} \cdot 100/rCl \leq 1,5$ для 109 проб, которые могут быть использованы для дальнейшего ГХК.

Фильтрация с использованием кальциево-натриевого коэффициента отсеяла большое количество проб. Установлено (рис. 6, б), что $rCa \cdot 100/rNa \leq 6$ только для 32 проб, 77 проб приняты как некондиционные.

Фильтрация по минерализации отсеяла еще 5 проб (рис. 6, в) и, наконец, использование филь-

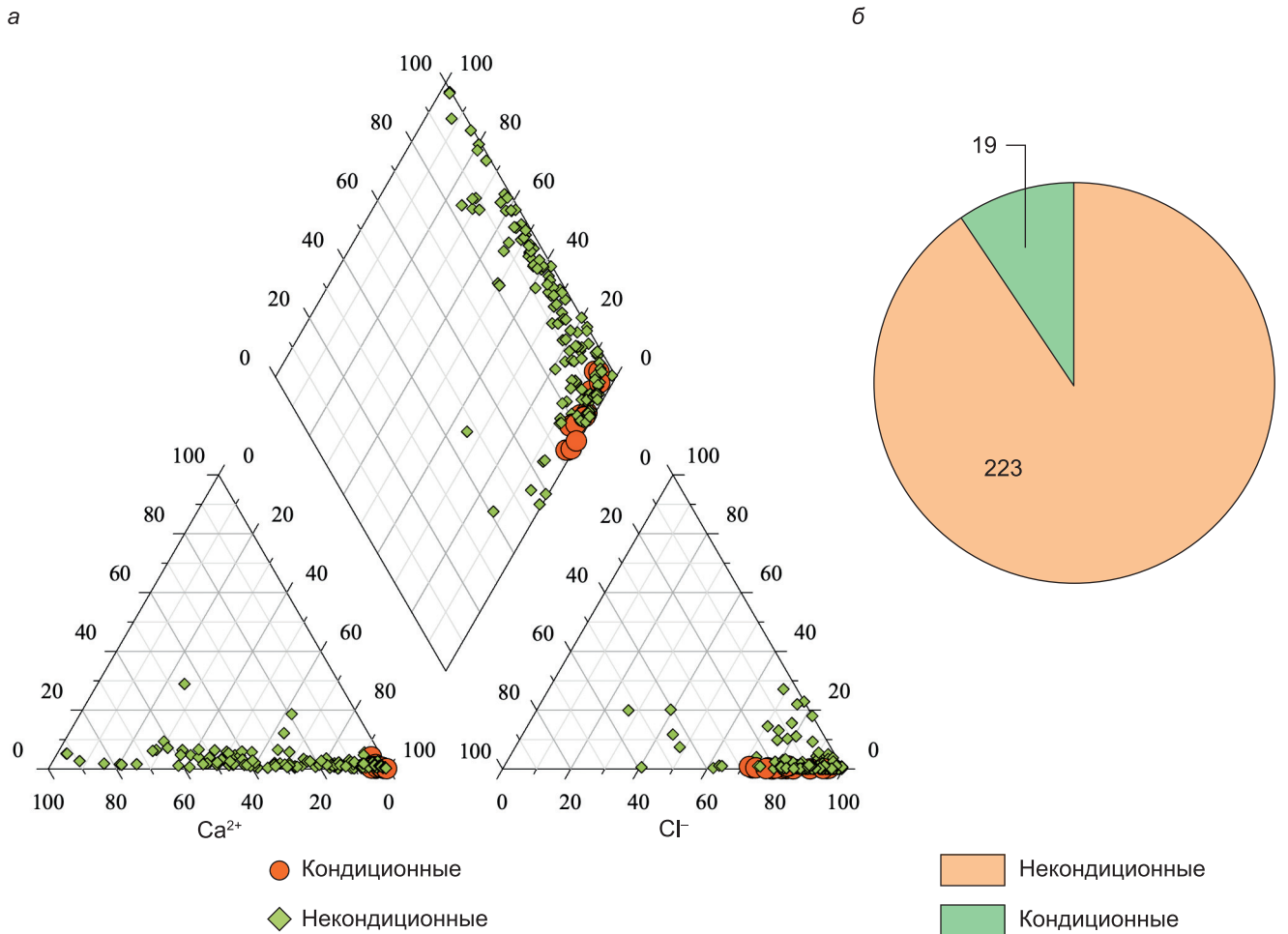


Рис. 4. Диаграмма Пайпера для исследуемой выборки проб подземных вод (а) и результаты геохимической фильтрации данных (б)

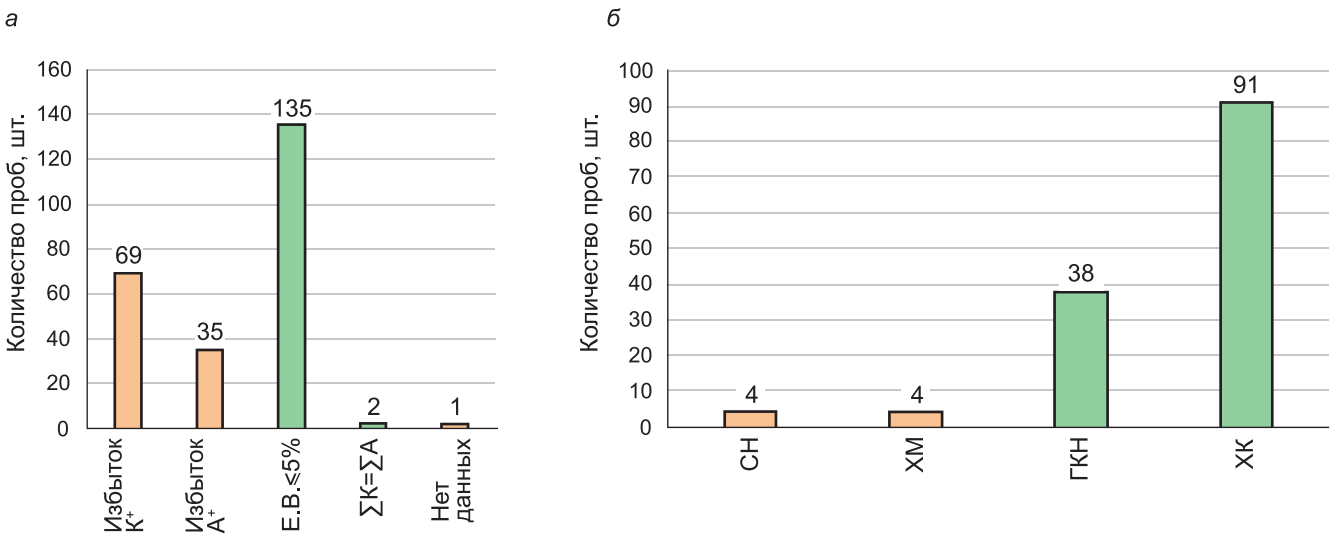


Рис. 5. Результаты проверки электронейтральности проб воды (а) и тип воды по Сулину (б)

тра по коэффициенту метаморфизации показало (рис. 6, г), что только 19 проб могут быть приняты кондиционными ($rNa/rCl > 1,1$) (рис. 4, б).

Таким образом, в результате ГХК из изначальной выборки (242 пробы) осталось только 8,1 % кондиционных анализов (рис. 4, б). Пробы после ГХК не показывают разброса на диаграмме Пайпера и по-

падают в типичную область состава Ач пластовой воды (рис. 4, а).

Значения минерализации и химический состав проб подземных вод после геохимической фильтрации представлены в табл. 4.

Минерализация пластовых воды Ач для всех точек лежит в диапазоне близких значений и изменя-

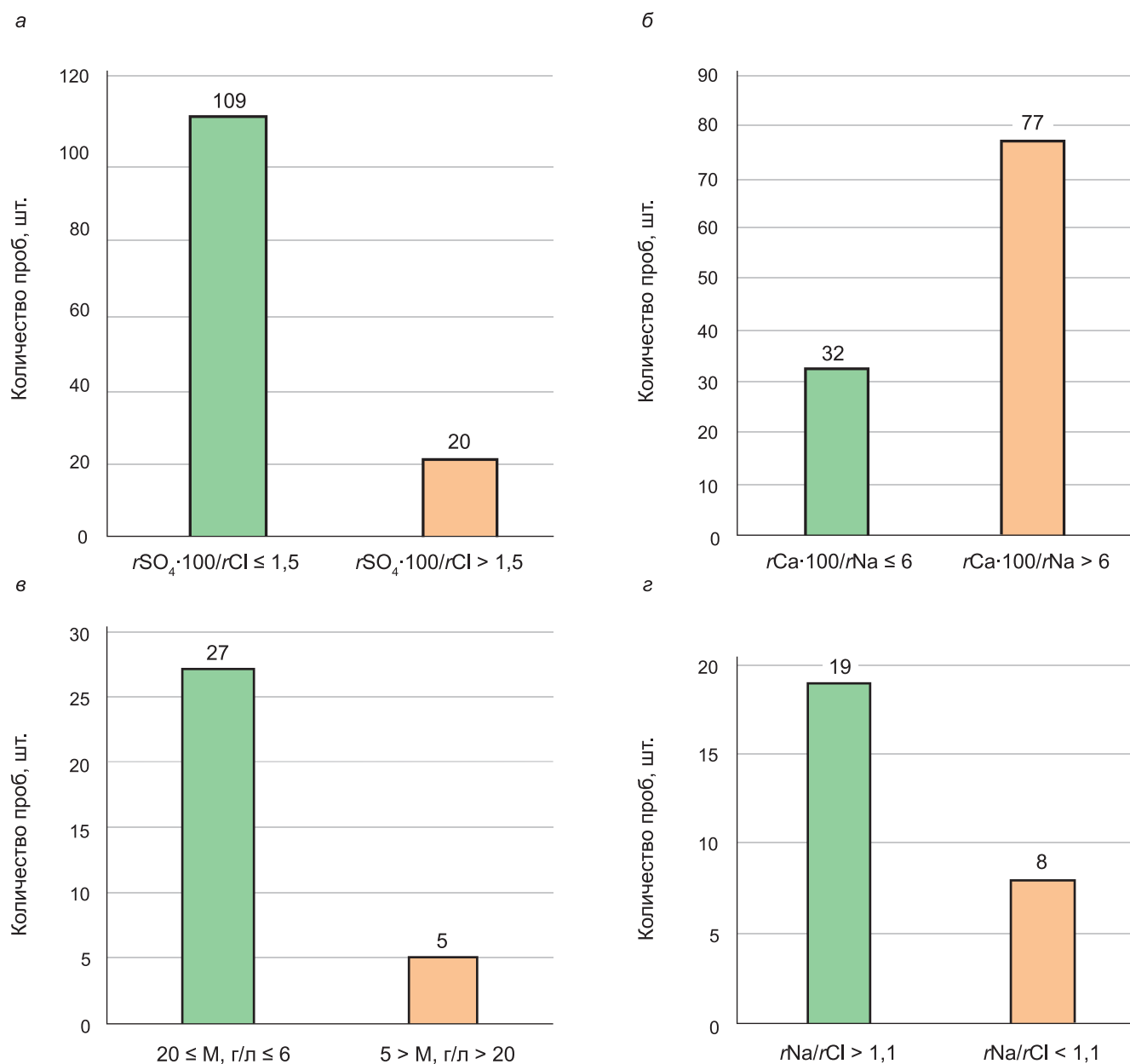


Рис. 6. Результаты фильтрации данных по гидрогеохимическим коэффициентам: сульфатно-хлорному (а), кальций-натриевому (б), минерализации (в) и натрий-хлорному коэффициенту (г)

ется от 5 до 13 г/л, в среднем 10 г/л, в большинстве попадая в область ошибки определения (20 отн.%). Диапазон изменения других макрокомпонентов (таких как натрий и калий, кальций, хлор, гидрокарбонат, сульфат) тоже не широкий (рис. 3, б). Содержание катионов — суммы $Na^+ + K^+$ изменяется от 2 до 5 г/л, в среднем 3,5 г/л; Ca^{2+} — от 15 до 169 мг/л, в среднем 63,5 мг/л, Mg^{2+} — от 0 до 24 мг/л, в среднем 8 мг/л. Содержание анионов — Cl^- изменяется от 2,5 до 6 г/л (в среднем 4,3 г/л), HCO_3^- — от 1 до 2,8 г/л (в среднем 2 г/л) и SO_4^{2-} — от 0 до 90 мг/л (в среднем 25 мг/л). Таким образом, химический состав проб пластовых вод Ач, оставшихся после проведения ГХК, хлоридно-натриевый с повышенным содержанием гидрокарбонат-иона и с минимальным содержанием сульфатов, что соотносится с литературными дан-

ными по составу пластовых вод ачимовской толщи [Бешенцев и др., 2019; Кошелев и др., 2014; Новиков, Лепокуров, 2005].

Полученный результат показывает, что 43 % данных имеет несбалансированное содержание катионов и анионов, что связано с некорректным выполнением самого химического анализа или суммировании ошибок отдельных методов при их использовании. Доказывая тем самым, что методические подходы, которые сегодня продолжают применяться в лабораториях ХАЛ, устарели. Они подразумевают определение содержания практически каждого макрокомпонента отдельным методом со своей ошибкой. Калий и натрий часто вообще не определяются, а вычисляются как их сумма по разности, хотя натрий в частности для пластовых вод

Таблица 4

Минерализация и химический состав проб подземных вод после геохимической фильтрации

№	Скважина	Пласт	ΣМ	Катионы			Анионы		
				Na ⁺ K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
			г/л	г/л	мг/л	мг/л	г/л	мг/л	г/л
1	200	Ач18-1	9	3,14	68	7	3,9	0	1,71
2	200	Ач18-1	11	4,22	34	0	5,31	9,6	1,81
3	200	Ач18-1 (Ач18-2)	10	3,8	26	0	4,71	10,3	1,77
4	200	Ач18-1	9	3,12	50	24	3,99	0,6	1,73
5	214		7	2,4	14,83	4,47	2,51	0	2,11
6	214		7	2,4	34,47	8,88	2,51	0	2,2
7	214	Ач15-1	5	1,96	66,7	2,6	2,49	21,7	0,88
8	214	Ач15-1	8	2,82	34,1	2,9	3,2	22,7	1,99
9	221	Ач18-1	12	4,33	75	13	5,92	5,4	1,76
10	222	Ач18-1	10	3,36	127	10,1	4,34	2	1,95
11	222	Ач18-1	10	3,29	101	9,7	4,32	2	1,97
12	225	Ач18-2	11	3,74	169	6,5	4,66	33,7	2,25
13	225	Ач18-1	10	3,54	103	11,2	4,58	21,4	1,95
14	226	Ач17-2	9	3,13	46,86	9,6	3,33	52,29	2,16
15	227	Ач17-3	11	4,07	74,4	13	5,17	81	1,73
16	227	Ач-18-1 (Ач17-3)	10	3,67	58,4	11,9	4,64	76	1,49
17	227	Ач-18-1 (Ач17-3)	11	4,16	68,1	14	5,35	90	1,77
18	502		12	4,1	26,9	4	4,76	36,6	2,81
19	502		13	4,71	27,1	3,5	5,53	15,5	2,78

Ач один из основных компонентов состава. Поэтому обязательно следует проводить раздельное количественное измерение натрия и калия, а не использовать расчетный метод для оценки их суммарного содержания [Na+K], поскольку сегодня на рынке есть методы и приборы, позволяющие делать это даже в полевых условиях.

Таким образом, огромное количество данных — почти половина — просто не пригодны для дальнейшего анализа и интерпретации в силу только методических и инструментальных проблем. Это ярко демонстрирует необходимость модернизации методических подходов и инструментальной базы гидрохимических лабораторий, в том числе лабораторий ХАЛ. В частности, значительно сократить ошибку поможет внедрение более современных методов анализа, позволяющих проанализировать максимальный набор компонентов в одной пробе воды (например, метод капиллярного электрофореза или ионнохроматографический метод). Следует отметить, что метод капиллярного электрофореза является сегодня основным лидером при оценке катионного и анионного состава вод, так как в результате анализа одной пробы определяются сразу все макро- и даже часть микрокомпонентов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, а также микрокомпоненты — NH₄⁺, Li⁺, Sr²⁺, Ba²⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, F⁻, I⁻, Br⁻, PO₄³⁻). Диапазон определяемых концентраций без разбавления пробы от 0,2 до 20 000 мг/дм³. При этом точность метода

не менее 2–3% в том числе и для минерализованных вод. Прибор для капиллярного электрофореза в модификации «Капель» достаточно компактен и может уместиться на части лабораторного стола даже в полевой лаборатории.

Для определения компонентов карбонатного равновесия (HCO₃⁻, CO₃²⁻ и CO₂) замена ручного титрования на автоматическое титрование на приборе (титраторе) с диагностикой точки эквивалентности по pH приведет к повышению достоверности оценки концентраций определяемых компонентов.

Крайне важным является внедрение обязательного контроля электронейтральности сразу после проведения полного химического анализа проб пластовой воды лаборантом в поле до его внесения в протокол. Данный подход позволит диагностировать корректность проведения анализа и в случае обнаружения проблем позволит провести повторное измерение. Кроме того, добавление в регламент анализа проб воды измерения удельной электрической проводимости (УЭП) и определения сухого остатка может служить еще одним дополнительным критерием контроля качества проведения химического анализа.

Переоснащение лабораторий ХАЛ более современным оборудованием и усовершенствование методических подходов позволит расширить диапазон определяемых компонентов в рутинных пробах пластовых вод до основных параметров (pH,

Eh, температура, УЭС, плотность, сухой остаток) и всех макро- и ряда микрокомпонентов (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , NH_4^+ , Fe^{2+} , Br^- , I^- , F^- , при хранении пробы также NO_3^- , NO_2^- , Fe^{3+}). Получение дополнительных данных по химическому составу в дальнейшем поможет еще более точно идентифицировать генезис воды (пластовая, техногенная, кондиционная или смесь) с применением последующих шагов геохимического контроля (в частности, геохимических коэффициентов на шаге 3).

Помимо усовершенствования методической и инструментальной базы крайне важно соблюдать регламент отбора проб. При обычном (негерметичном) отборе проб искажения состава могут быть связаны как с отрицательным влиянием соприкосновения с атмосферным воздухом, так и с изменением термобарических условий [Balaram, Satyanarayanan, 2022]. При герметичном отборе, но без сохранения или с частичным сохранением термобарических условий искажения состава связаны только с изменением начальных термобарических условий, в которых существовала вода до отбора.

Обычный отбор проб воды обеспечивает эффективное определение только устойчивых компонентов (хлор, сульфаты, натрий, калий и пр.). Концентрации ряда компонентов пластовых вод, тесно связаны с термобарическими и физико-химическими условиями их существования. С изменением температуры и давления, изменения pH и Eh происходит частичное выделение компонента из раствора [Appelo, Postma, 2005; Geboy, Engle, 2011; Методическое..., 1995; Корценштейн, 1991; Корценштейн, 1963]. В этом случае для определения действительных концентраций тех или иных компонентов пластовых вод можно проводить лишь герметичный отбор проб с сохранением термобарических условий точки отбора пробы, либо консервирование неустойчивых компонентов пластовых вод на забое скважин с помощью различных модификаций глубинных пробоотборников, либо определение этих компонентов с помощью селективных электродов. При герметичном отборе, но без сохранения начальных термобарических условий, искажения состава могут быть связаны с изменением концентраций ряда компонентов с переменной валентностью, компонентов систем карбонатного, сульфатного и других равновесий.

Следует отметить, что при невозможности проведения химического анализа в течение двух часов после отбора пробу пластовой воды следует добавить в регламент фильтрование пробы и ее последующее консервирование. Это поможет получить более качественные данные для дальнейшей интерпретации как геохимических, так и петрофизических данных.

Часто с соблюдением всех правил отбора, может быть отобрана проба без соблюдения регламента отбора, например, при не установившейся минерализа-

ции воды в ходе прокачки или испытания скважины. В результате отбирается проба, в которой присутствует не только пластовая вода, а смесь в разных пропорциях пластовой и технических жидкостей, используемых в процессе бурения и опробования скважин. Согласно результатам геохимического контроля (шаг 3), до 45 % проб содержали примесь технической воды и не могут характеризовать геохимическую картину состава истинных пластовых вод. Таким образом, нужно также усовершенствовать протокол отбора пробы (увеличение времени прокачки скважины при возможности, более точный мониторинг стабилизации минерализации и пр.) для увеличения шанса отбора именно природной воды, а не ее смеси с технической жидкостью. Кроме того, эффективно было бы в контрольных пробах пластовых вод проводить определение содержания микрокомпонентного состава (в том числе металлов, радиоактивных и редкоземельных элементов) и изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$), что позволит использовать более современные методические подходы для геохимического контроля и в том числе даст возможно рассчитать долю технической воды в смеси и выйти на показатель минерализации именно пластовой воды.

Корректная и полная гидрогеохимическая информация о химическом составе пластовых вод необходима не только для подсчета запасов и разработки залежи, но и для мероприятий ее сопровождающих (подземное захоронение промстоков, борьбы с коррозией, предупреждение солеобразования и солетоложений, попутные поиски и прочее).

Заключение. Результаты ГХК выборки данных анализов химического состава пластовой воды Ач показали, что кондиционными и пригодными для дальнейшего использования данными являются только 8,1 % проб из 242. Эти пробы максимально по своему составу приближены к составу пластовой воды Ач и могут в дальнейшем использоваться как эталонные пробы.

Установлено, что практически в равных долях ошибки отсеянных данных связаны с некорректным выполнением химического анализа (шаг 1 — 44 %) и отбором загрязненных техническими жидкостями проб (шаг 2 и 3 — 48 %). Снизить такой высокий процент отсеивания данных можно путем изменения методических подходов и усовершенствования инструментальной базы лабораторий ХАЛ, а также выполнением сразу после анализа воды шага 1 ГХК — проверки электронейтральности, и в случае не сходимости проведения повторных измерений. Кроме того, корректировка и разработка протоколов регламента отбора проб с учетом геологического строения территории и конструкции скважины, увеличение времени прокачки скважины при испытании может помочь отбирать пробы с минимальным содержанием примеси технической воды в дальнейшем. Такой ряд мероприятий и усовершенствований в значительной мере сократит потери неустойчивых

компонентов и повысит качество данных анализов воды.

Усовершенствование анализов пластовых и попутных вод месторождений, основанное на внедрении современного лабораторного оборудования и разработке новых методик проведения физико-химических исследований, позволит получать кондиционные данные состава и минерализации вод, что несомненно повысит уровень прогноза геофизической информации и сократит расходы компаний на опробование.

В любом случае, даже кондиционные лабораторные анализы химического состава подземных вод приближают нас к реальным пластовым химическим составам пластовых вод лишь в той или иной степени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бешенцев В.А., Сальникова Ю.И., Абдрашитова Р.Н., Воробьева С.В. Гидрогеохимические условия нефтегазовых областей Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона (часть 1) // Нефть и газ Тюмени. 2019. № 5. С. 10–22.

Зытнер Ю.И., Чибисова В.С. Гидрогеологические критерии прогноза нефтегазоносности северных районов Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. № 8. С. 1–19.

Карцев А.А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. М.: Недра, 1972. 280 с.

Карцев А.А., Вагин С.Б., Матусевич В.М. Гидрогеология нефтегазоносных бассейнов. М.: Недра, 1986. 224 с.

Корценштейн В.Н. Методика гидрогеологических исследований нефтегазоносных районов. М.: Гостоптехиздат, 1963. 167 с.

Корценштейн В.Н. Методика гидрогеологических исследований нефтегазоносных регионов. М.: Недра, 1991. 418 с.

Кошелев А.В., Ли Г.С., Катаева М.А. Оперативный гидрохимический контроль за обводнением пластовыми водами объектов разработки Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения // Вести газовой науки. 2014. № 3. С. 106–115.

Методическое руководство по гидрогеохимическому контролю за обводнением газовых и газоконденсатных месторождений. М.: ВНИИГАЗ, 1995. 90 с.

Полученные результаты геохимического контроля для выборки состава проб воды Ач выявили, к сожалению, уже острую проблему получения некондиционных данных в ходе опробования и однозначно указали на необходимость к изменению как регламента отбора пробы, так и методов анализа ее химического состава. Данная ситуация, связанная в основном с низким качеством химических анализов, является типичной и при гидрогеохимическом опробовании водозаборных скважин и без сомнения требует незамедлительного реагирования и усовершенствования на государственном уровне.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Новиков Д.А., Лепокуров А.В. Гидрогеологические условия нефтегазоносных отложений на структурах южной части Ямало-Карской депрессии // Геология нефти и газа. 2005. № 5. С. 24–33.

Сулин В.А. Условия образования, основы классификации и состав природных вод, в частности воды нефтяных месторождений. Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1948. 107 с.

Хорн Р. Морская химия. М.: Мир, 1972. 399 с.

Appelo C.A.J., Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution. London: A.A. Balkema Publishers, 2025. 649 p.

Balaram V., Satyanarayanan M. Data Quality in Geochemical Elemental and Isotopic Analysis // Minerals. 2022. 12, 999. 1–18 p. doi.org/10.3390/.

Geboy N.J., Engle M.A. Quality assurance and quality control of geochemical data — A primer for the research scientist. U.S. // Geological Survey Open-File Report. 2011. 1187. 28 p.

Smee B.W., Bloom L., Arne D., Heberlein D. Practical applications of quality assurance and quality control in mineral exploration, resource estimation and mining programmes: a review of recommended international practices // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2024. Vol. 24. doi.org/10.1144/geochem2023-046.

Статья поступила в редакцию 02.11.2025,
одобрена после рецензирования 12.11.2025,
принята к публикации 24.04.2026