

УДК 550.46

Состояние равновесия промышленных вод южных районов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с минералами вмещающих пород

А. Н. Никитенков^a, Д. А. Новиков^{b, c}, А. В. Плюснин^c^a Томский политехнический университет

634058, Томск, пр. Ленина 30.

^b Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН

630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3.

^c Альметьевский Государственный Технологический университет «Высшая школа нефти»

423462, Альметьевск, Советская ул., 186А. E-mail: sputnik70@yandex.ru

(Статья поступила в редакцию 27.01.2026 г.)

В статье рассматривается равновесно-неравновесное состояние системы вода – горная порода применительно к ряду характерных для Волго-Уральской нефтегазовой провинции условий, определяемых составом пород-коллекторов с содержащимися в них рассолами. При оценке используется набор потенциально образующихся в этих обстановках вторичных минералов, а также набор первичных минералов, слагающих коллектор. Результаты характеризуют общее гидрогеохимическое состояние системы вода – порода для наиболее распространенных в пределах эксплуатирующихся горизонтов Волго-Уральской нефтегазовой провинции. Результаты показывают, что подавляющее большинство рассматриваемых коллекторов находятся в неравновесном состоянии относительно содержащихся в них рассолов, состав которых продолжает эволюционировать.

Ключевые слова: *рассолы, параметр насыщенности, геохимические взаимодействия, Волго-Уральская нефтегазоносная провинция.*

DOI: 10.17072/psu.geol.25.2.120

Введение

Изучение геохимических равновесий в коллекторах, содержащих нефть и газ, особенно в условиях разработки месторождений нефти и газа, при регулярно меняющихся вследствие работы системы поддержания давления температуре и давлении, а также перемешивании рассолов и смене окружающего их минералогического состава коллекторов представляет особый интерес, т.к. в ряде случаев эти процессы ведут к коагулированию скважин продуктами вторичного минералообразования. Для первичной и обобщенной оценки направленности этих процессов в данной работе осуществлен расчет параметра насыщенности (индекса неравновесности) ряда рассолов по отношению к вмещающим их породам, а также

набору потенциально образуемых минералов вторичной фазы (Шварцев и др., 2005).

Оценка параметра насыщенности была осуществлена средствами программного комплекса HydroGeo, позволяющего решать множество геохимических задач (Букаты, 2002; Никитенков и др., 2023; Хвощевская и др., 2021; Dutova, 2019; Nikitenkov et al., 2024; Novikov, 2020, 2022), использующего методы математического термодинамического моделирования взаимодействий в системе вода – порода и базирующегося на вычислении констант активности для реагирующих компонентов системы с использованием подходов Питцера (Питцер, 1992; Шварцев и др., 2005; Пригожин, 1966).

Рассматриваемая система вода – порода в модели представлена набором первичных ионов: H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Li^+ , Al^{3+} , Rb^+ ,

© Никитенков А. Н., Новиков Д. А., Плюснин А. В., 2026



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Sr^{2+} , Ba^{2+} , Mn^{3+} , Fe^{3+} , OH^- , Br^- , $(\text{HCO}_3)^-$, $(\text{H}_2\text{BO}_3)^-$, $(\text{SO}_4)^{2-}$, Cl^- , H_2O , SiO_2 , CO_2 , $(\text{CO}_3)^{2-}$ первичную, так и возможную вторичную твердую фазу (табл. 1).
а также рядом минералов, составляющих как

Таблица 1. Перечень входящих в моделируемую систему минералов

Формула	Минерал
$(\text{Fe}^{2+})(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$	магнетит
$(\text{Fe}^{2+})\text{CO}_3$	сидерит
$(\text{Fe}^{2+})\text{CO}_3\text{сф}$	сидерит сферол.
$(\text{Fe}^{2+})\text{S}_2$	пирит
$(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3$	гематит
$(\text{Fe}^{3+})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	глин. минер.
$(\text{Fe}^{3+})\text{OOH}$	гётит
$(\text{Mn}^{2+})\text{CO}_3$	родохрозит
$\text{Al}(\text{OH})_3$	гиббсит
$\text{Al}(\text{OH})_3\text{ал}$	байерит
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_{4\text{к}}$	каолинит
$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2\text{м}}$	монтмориллонит
$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2\text{п}}$	пирофиллит
$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	хлорит(Al)
AlOOH	бёмит
BaSO_4	барит
$\text{Ca}_{1.15}\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	монтмориллонит(Ca)
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	пренит
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	анортит
$\text{CaCO}_3\text{а}$	арагонит
$\text{CaCO}_3\text{к}$	кальцит
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	доломит
$\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$	гунтит
CaSO_4	ангидрит
$\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$	гипс
$\text{K}(\text{Fe}^{2+})\text{AlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2\text{м}}$	мусковит(Fe^{2+})
$\text{K}(\text{Fe}^{3+})_3\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	биотит(K-Fe^{3+})
$\text{K}_{33}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	бейделлит(K)
$\text{K}_3\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	монтмориллонит(K)
$\text{K}_5(\text{Fe}^{3+})\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	иллит(K-Fe^{3+})
$\text{K}_{56}\text{Na}_{0.04}\text{Mg}_{2.24}\text{Al}_{2.68}\text{Si}_{3.22}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	иллит
$\text{K}_5\text{Al}_{2.5}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	иллит(K)
$\text{K}_{63}\text{Na}_{0.17}\text{Ca}_{1.45}(\text{Fe}^{3+})_{.327}\text{Mg}_{.349}\text{Al}_{1.9}\text{Si}_{3.421}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	иллит
$\text{K}_{.67}\text{Al}_{2.67}\text{Si}_{3.33}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	иллит($\text{K}_{.67}$)
$\text{K}_{.6}\text{Mg}_{2.5}\text{Al}_{2.3}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	иллит(K-Mg)
$\text{K}_{.8}\text{Al}_{2.56}\text{Si}_{3.38}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	иллит($\text{K}_{.8}$)
$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	алунит
$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	мусковит
KAlSi_3O_8	полевой шпат (K)
$\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2\text{м}}$	мусковит(Mg)
$\text{Mg}_{.67}(\text{Fe}^{3+})_{.14}\text{Al}_{1.84}\text{Si}_{3.68}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	монтмориллонит(Mg-Fe^{3+})
$\text{Mg}_{2.75}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	иллит(Mg)
$\text{MgAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$	монтмориллонит(Mg)
MgCO_3	Магнезит
$\text{Na}_{.27}\text{Ca}_{.1}\text{K}_{.02}(\text{Fe}^{3+})_{.19}\text{Mg}_{.22}\text{Al}_{1.58}\text{Si}_{3.94}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	монтмориллонит(Na-Ca)
$\text{Na}_{.33}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	бейделлит(Na)
$\text{Na}_{.3}\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	монтмориллонит(Na)
$\text{NaAlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$	анальцим
$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	альбит
NaCl	галит
$\text{SiO}_2\text{кв}$	кварц
$\text{SiO}_2\text{х}$	халцедон
SrCO_3	стронцианит
SrSO_4	целестин

Исходный состав* рассолов представлен в табл. 2.

В результате проведенных расчетов средними рассматриваемого программного комплекса были оценены параметры насыщенности рассолов к ряду первичных и вторичных минералов, что продемонстрировано

в табл. 3. Положительные значения индекса соответствуют состоянию насыщенности вод к минералу и говорят о возможности выпадения данного минерала из раствора, отрицательные – к способности раствора растворять данный минерал при его наличии в коллекторе.

Таблица 2. Состав рассолов (г/л) и основные параметры водоносных горизонтов

Компонент	артинский	ассельский	башкирский	визейский	вятский	гжельский	живетский	казанский	кунгурский	московский	сакмарский	серпуховский	турнейский	уржумский	уфимский	фаменский	франский	эйфельский	эмский
Ca ²⁺	0,608	14,54	99,78	15,7	0,401	9,266	42,51	1,089	0,752	12,62	21,58	19,82	8,955	7,59	50,35	8,718	31,58	33,16	42,66
Mg ²⁺	31,03	4,786	2,65	3,46	0,452	2,068	2,819	60,77	89,9	2,95	4,875	6,12	2,301	1,035	11,64	1,473	4,297	4,773	3,371
Na ⁺	67,33	77,76	78,48	64,82	19,45	69,84	45,34	50,76	25,76	80,79	63,73	54,2	79,36	110,2	58,11	73,39	60,77	51,84	59,33
K ⁺	2,08	2,41	2,43	2,005	0,602	2,16	1,402	1,57	0,797	2,499	1,97	1,676	2,454	3,408	1,797	0,034	1,88	1,603	1,835
Fe ³⁺	0,001	0,282	0,001	0,001	0,788	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1,642	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Br ⁻	4,795	0,715	0,4635	0,503	0,009	0,266	1,886	4,715	4,161	0,469	0,8	0,686	0,283	0,283	1,612	0,3445	1,295	1,181	0,021
(HCO ₃) ⁻	1,293	0,214	0,001	0,183	0,19	0,049	0,092	1,519	2,593	0,165	0,177	0,012	0,85	0,971	0,317	0,018	0,037	0,073	0,061
(SO ₄) ²⁻	10,74	0,899	1,436	0,79	1,67	0,822	0,113	0,41	1,796	0,69	0,638	6,547	0,681	1,475	0,27	0,502	0,319	0,519	0,016
Cl ⁻	189,9	158,9	147,1	139,2	30,95	133	155,5	230,6	288,2	157,8	151,2	138,7	148,5	190,3	215	134,1	164,7	154,3	180
pH	6,08	5,98	6,22	6,49	8,2	7	5,66	6,444	5,39	7,58	5,91	6,7	4,5	7,35	5,32	4,9	5,56	5,47	4
Eh(мВ)	25,17	25,17	31,82	46,03	32,49	17,6	30,32	44,12	19,65	16,87	32,55	36,3	34,17	32,6	27,43	23,68	37,05	37,38	50,68
M(г/л)	307,8	260,5	332,3	226,7	54,52	217,5	250	351,4	414	258	246,6	227,8	243,4	315,3	339,1	219	264,9	247,5	288,9
t (град.С)	23,5	35,8	60,2	45	6	35	90	12,6	43	45	58	51,6	47	14,8	13,1	72	64	118	48
P (МПа)	12,6	20,2	31,2	24,5	0,1	19,6	47,9	4,2	22,9	23,5	30,6	27,5	24,6	7,4	5,6	38,5	40	63,6	24,5

*Для ряда химических элементов (Al, Mn), содержание которых в растворе низко либо не анализировалось, была введена концентрация в 1 мг/л для оценки потенциального образования вторичной фазы и анализа насыщенности вод к содержащим данные элементы минералам (т.е. потенциально выпавшим в осадок из вод на момент проведения анализа). Содержания отдельных компонентов, не включенных в таблицу: в живетском водоносном горизонте Rb = 0,00011 г/л, Li = 0,00024 г/л; Sr = 0,3325 г/л; в фаменском Sr = 0,3164 г/л, SiO₂ = 0,0508 г/л; в эмском Ba = 1,678 г/л; фоновые концентрации по данным элементам брались также в 1 мг/л.

Характеризуя полученные результаты, следует отметить сложную картину взаимодействия рассолов с минеральным составом коллекторов. Для большинства минералов, как первичных, так и вторичных, характерно преобладание отрицательных значений индекса насыщенности, что свидетельствует о способности подземных вод растворять большинство рассматриваемых минералов.

Для гидроксидов алюминия (гиббсит, байерит, бёмит) свойственны преимущественно положительные значения индекса насыщенности во всех горизонтах, кроме турнейского, уфимского, эмского, что говорит о высоком потенциале их осаждения или стабильного существования в большинстве рассматриваемых коллекторов. Для глинистых минералов (каолинит, монтмориллонит,

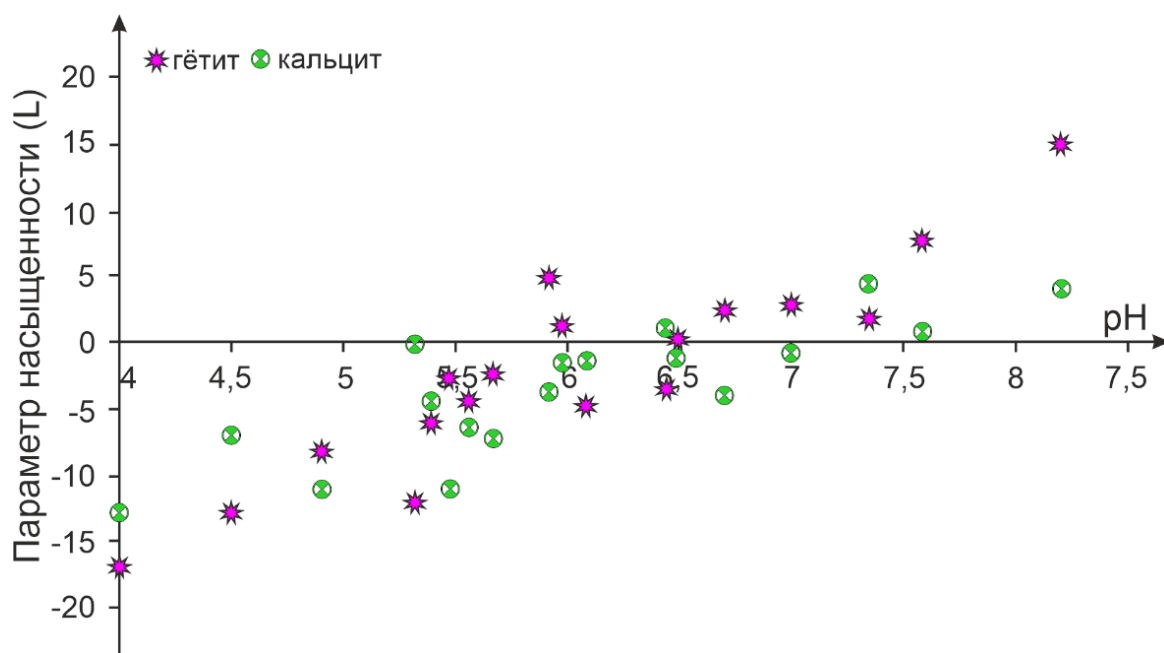
иллиты, пиррофиллит, хлорит) характерны преимущественно отрицательные значения индекса насыщенности. Лишь в редких случаях (например, иллит(K-Fe³⁺) во франском горизонте) значения приближаются к равновесию. Оксиды и гидроксиды железа/марганца (магнетит, гематит, гётит, родохрозит, сидериты) характеризуются индексами от отрицательных до положительных. Так, сидериты и родохрозит почти всегда не насыщены, в то время как магнетит, гематит, гётит могут осаждаться в отдельных зонах (например, в вятском горизонте). Насыщенность к карбонатам (кальцит, арагонит, доломит, магнезит, стронцианит) также сильно варьирует: доломит чаще других проявляет тенденцию

к

Таблица 3. Параметр насыщенности (индекс неравновесности) рассолов коллекторов к минеральной фазе*

Минерал	аргинский	ассельский	башкирский	визейский	вятский	гжельский	живетский	казанский	кунгурский	московский	сакмарский	сергухов-ский	турнейский	уржумский	уфимский	фаменский	франский	эйфельский	эмский
магнетит	-16	2,5	-6	-2,1	39	4,4	-8,6	-12	-18	18	13	3,7	-38	2,4	-34	-25	-15	-8,5	-48
сидерит	-6,6	-3,4	-1000	-7,5	4,4	-7,8	-10	-5,5	-5,8	-5,4	-1,6	-9,5	-13	-4,8	-11	-14	-12	-11	-20
сидерит сферол.	-7,6	-4,8	-1000	-9,3	4,2	-9,1	-13	-6	-7,5	-7,2	-3,8	-12	-14	-5,4	-12	-17	-14	-15	-22
гематит	-17	-4,5	-8,6	-6,4	21	-1,7	-10	-15	-19	8,4	3	-2	-34	-3,6	-31	-23	-15	-9,9	-40
гётит	-4,9	1,3	-1,1	0,3	15	2,8	-2,3	-3,6	-6	7,7	4,9	2,5	-13	1,9	-12	-8,3	-4,4	-2,5	-17
родохрозит	-6,3	-10	-1000	-9,3	1,8	-8,5	-15	-4,2	-8,8	-7,4	-12	-12	-15	-3,6	-9,6	-18	-15	-17	-22
гипс	4,7	6,8	5,6	6,8	7	6,6	4,4	4,5	3,9	4,4	6,3	5,8	-2,7	7,5	1,4	0,81	4,9	2,8	-6,3
байерит	4,2	6,3	5	6,3	6,4	6,1	3,9	3,9	3,4	3,9	5,8	5,2	-3,2	7	0,92	0,31	4,4	2,3	-6,8
бёмит	0,69	3	2,4	3,1	2,7	2,8	1,9	0,31	0,17	0,81	3	2,3	-6,2	3,4	-2,7	-2,2	1,6	1,1	-9,8
барит	1,7	-0,66	-2,3	-0,8	2,9	-0,42	-4,1	-0,61	0,83	-1	-1,4	0,58	-0,96	-0,3	-1,5	-1,6	-2,1	-3,2	2,5
арагонит	-1,7	-1,9	-1000	-1,5	3,7	-1	-7,6	0,79	-4,8	0,49	-4,1	-4,3	-7,3	4,2	-0,49	-11	-6,7	-11	-13
кальцит	-1,4	-1,6	-1000	-1,2	4,1	-0,73	-7,3	1,1	-4,5	0,79	-3,8	-4	-7	4,5	-0,13	-11	-6,4	-11	-13
доломит	2,8	0,52	-1000	3,6	5,1	1,8	0,18	4,6	2,9	7,4	1,6	0,26	-7,5	5,6	-3,4	-9,9	-3	-0,5	-20
гунтит	-3,4	-13	-1000	-6	-3,1	-10	-12	-0,29	-1	1,4	-9,2	-12	-28	-4,7	-22	-32	-19	-11	-54
ангидрит	-2,7	-1,1	0,34	-0,88	-3,3	-1,4	-1,7	-5	-3,1	-1,2	-0,73	0,83	-1,4	-2,2	-1,8	-1,3	-0,87	-0,36	-3,8
гипс	-2	-5,4	-13	-8,6	5,1	-5,3	-25	0,35	-10	-9	-13	-9,3	-10	2	3,3	-19	-15	-32	-13
биотит(K-Fe+3)	28	54	43	52	99	60	34	32	18	68	63	55	-1000	64	-1000	-4,4	28	29	-1000
алунит	8,6	10	2	5,4	2,2	2,8	-3,5	1,6	5,7	-9,4	6,1	3,2	-9,3	7	-1	-8,4	2,5	-4,8	-25
магнезит	0,6	-3	-1000	-1,4	-0,11	-2,5	-3	1,4	1,5	0,4	-2,2	-2,7	-6,9	-1,3	-5,4	-7,9	-4,8	-2,6	-14

*К ряду минералов вода стабильно и значимо недонасыщена во всех водоносных горизонтах: пирит, глинистый минерал, каолинит, монтмориллонит, пирофиллит, хлорит (Al), монтмориллонит (Ca), пренит, анортит, бейделлит (K), монтмориллонит (K), иллит (K-Fe³⁺), иллит, иллит (K), иллит (K.67), иллит (K-Mg), иллит (K.8), мусковит, полевошпат (K), мусковит(Mg), монтмориллонит(Mg-Fe³⁺), иллит(Mg), монтмориллонит(Mg), монтмориллонит (Na-Ca), бейделлит (Na), монтмориллонит(Na), анальцит, альбит, кварц, халцедон, стронцианит. По галиту и целестину параметр насыщенности в ряде случаев близок к нулю, но все же находится в зоне недонасыщения.

**Рис. 1.** Зависимость параметра насыщенности вод к кальциту и гётиту от величины pH

осаждению (горизонты визейский, вятский, казанский, московский, уржумский). Кальцит и арагонит преимущественно не насыщены, за исключением единичных точек (кальцит в вятском горизонте), магнезит и стронцианит обычно растворяются. У сульфатов (гипс, ангидрит, барит, целестин) преобладает ненасыщенность. Так, барит наиболее склонен к осаждению (горизонты артинский, вятский, эмский). Гипс может формироваться в вятском и уржумском горизонтах, а целестин – в фаменском горизонте. Ангидрит в основном неустойчив.

При анализе типичных первичных минералов, составляющих коллектора, отмечается, что к кварцу и халцедону воды устойчиво ненасыщены во всех горизонтах (значения от –10 до –19), полевые шпаты (альбит, анортит, калиевый полевой шпат) также растворяются. Слюды (биотит, мусковит) могут вести себя разнонаправленно. К галиту растворы ненасыщены. К анальциму и алуниту – преимущественно ненасыщены, хотя алунит может осаждаться в отдельных горизонтах (артинский, ассельский, сакмарский, уржумский).

Таким образом, рассматриваемые рассолы являются агрессивными по отношению к породообразующим минералам.

Говоря об общих закономерностях между параметрами насыщенности и характеристиками исходных растворов, можно выделить следующие общие тенденции: зависимость от pH наблюдается для группы оксидов и гидроксидов, в частности минералов, содержащих Fe, насыщение к которым формируется в щелочных и окислительных условиях. К гидроокислам алюминия рассолы насыщены во всех горизонтах, независимо от pH и минерализации (только при значимо кислых условиях могут быть исключения). Воды потенциально могут выделять их даже при крайне низких содержаниях Al (1 мг/л, введенных как фон). Поведение карбонатов также контролируется в первую очередь pH и соотношением содержания в растворе Ca и Mg. Граница насыщения проходит в районе pH ~6,5–7. В кислых средах (pH <6, например, артинский, ассельский, эмский горизонты) воды не насыщены к карбонатам. Для образования сидерита необходимо сочетание как щелочного pH, так и восстановительной

обстановки. Типичные виды рассматриваемых зависимостей представлены на рис. 1.

Насыщенность к сульфатам определяется преимущественно содержаниями SO_4 и катионов: Ca (для гипса), Ba (для барита). При этом заметное насыщение к бариту наблюдается только там, где содержание бария выше фона.

Заключение

Рассолы в большинстве из 19 изученных водоносных горизонтов демонстрируют ненасыщенность по отношению к подавляющему большинству рассмотренных минералов, особенно к первичным (кварц, полевые шпаты, мусковит), глинам, пириту, галиту, карбонатам (кроме доломита) и сульфатам, что свидетельствует о том, что состав рассолов находится на стадии формирования, а для вод характерна тенденция пусть и к медленному (даже при условии отсутствия возмущений геохимического фона техногенными процессами), но растворению минерального вещества коллекторов. При этом выделяются гидроксиды алюминия: гиббсит, байерит, бёмит, к которым рассматриваемые рассолы устойчиво насыщены и возможность образования которых контролируется содержанием алюминия в растворе (за счет его перехода из первичной фазы).

Из рассматриваемых выделяется вятский горизонт как находящийся на ранней стадии формирования состава (возможно, вследствие антропогенных изменений) и характеризующийся щелочным pH, а также относительно низкой минерализацией, что благоприятствует осаждению оксидов железа, карбонатов (доломит), сульфатов (гипс) и биотита. Несмотря на относительно высокую минерализацию, но за счет околонеutralных величин pH, московский и уржумский горизонты также характеризуются условиями, благоприятными для формирования некоторых минералов (доломит, оксиды железа, гипс). Характеризующиеся низкими (4–5,3) значениями pH турнейский, уфимский, эмский горизонты соответствуют наиболее низким значениями индекса равновесности практически для всех минеральных групп, включая обычно стабильные гидроксиды

алюминия, и обладают наибольшим потенциалом растворения.

Таким образом, минеральный состав коллекторов может испытывать значительное геохимическое воздействие со стороны подземных вод со значительным преобразованием как состава водовмещающих пород, так и самих рассолов, что будет рассмотрено нами в дальнейших исследованиях.

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования № FWZZ-2026-0047.

Библиографический список

- Букаты М. Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Изв. ТПУ. 2002. Т. 305, Вып. 6. С. 348–365.
- Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. Т. 1. Система вода – порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / под ред. С. Л. Шварцева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 244 с.
- Никитенков А. Н., Новиков Д. А., Корнеева Т. В. Формы миграции химических элементов в радоновых водах юга Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2023. № 2. С. 81–90.
- Никитенков А. Н., Новиков Д. А., Максимова А. А., Пенигин А. В., Вакуленко Л. Г., Вараксина И. В., Жуковская Е. А. Геохимические последствия захоронения углекислого газа в терригенных коллекторах // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2023. Т. 56, № 4Б. С. 130–137.
- Никитенков А. Н., Новиков Д. А., Максимова А. А., Пенигин А. В., Вараксина И. В., Жуковская Е. А. О возможности реализации проектов CCS в карбонатных коллекторах Сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 8. С. 68–78.
- Питццер К. С. Термодинамическая модель плотных водных растворов // Термодинамическое моделирование в геологии (минералы, флюиды, расплавы). М.: Мир, 1992. С. 110–153.
- Пригожин И., Дефэй Р. Химическая термодинамика. Новосибирск: Наука, 1966. 509 с.
- Хвощевская А. А., Новиков Д. А., Копылова Ю. Г., Сметанина И. В., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф. Роль системы «вода – порода» в процессах формирования состава природных вод Севастопольской городской агломерации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 1. С. 118–128.
- Dutova E., Nikitenkov A., Kuzevanov K. The HydroGeo Software Package and Its Usage // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 98. 04005. DOI: 10.1051/e3sconf/20199804005 EDN: LDYXZB
- Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Korneeva T.V. et al. Numerical Physicochemical Modeling of the Geochemical Behavior of Uranium and Thorium in Radon Waters of Southern Siberia. // Aquatic Geochemistry. 2025. Vol. 31, 6. DOI: 10.1007/s10498-025-09440-3 EDN: OBZYCJ
- Nikitenkov A. N., Novikov D. A., Maksimova A. A., Penigin A. V., Varaksina I. V., Zhukovskaya E. A. On the Possibility of Implementing CCS Projects in the Carbonate Reservoirs of the Siberian Platform // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. Vol. 58, No. 4. P. 1283–1292.
- Novikov D. A. Hydrogeochemistry of authigenic mineral formation in Upper Jurassic sediments (the Nadym-Taz interfluvial area, Arctic regions of Western Siberia) // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 122, № 104704.
- Novikov D. A. Equilibrium modeling of water-gas systems in Jurassic-Cretaceous reservoirs of the Arctic petroleum province, northern West Siberia // Petroleum Exploration and Development. 2022. Vol. 49, No. 2. P. 363–373.

Equilibrium State of Industrial Waters of the Southern Regions of the Volga-Ural Oil and Gas Province with Minerals of Host Rocks

A.N. Nikitenkov^a, D.A. Novikov^{b,c}, A.V. Plyusnin^c

^aTomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., Tomsk 634058, Russia

^bTrofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russia

°Almetyevsk State Technological University. Higher School of Oil, 186A Sovetskaya Str., Almetyevsk 423462, Russia

The article considers the equilibrium-nonequilibrium state of the “water-rock” system in relation to a number of conditions characteristic of the Volga-Ural oil and gas province, determined by the composition of reservoir rocks with brines contained in them. The assessment uses a set of secondary minerals potentially formed in such reservoirs, as well as a set of primary minerals composing the reservoir. The results characterize the general hydrogeochemical state of the water-rock system for the most widespread within the exploited horizons of the Volga-Ural oil and gas province. The results show that the vast majority of the reservoirs under consideration are in a nonequilibrium state relative to the solutions contained in them, the composition of which continues to evolve slowly.

Key words: *brines; saturation parameter; geochemical interactions.*

References

- Bukaty M.B. 2002. Razrabotka programmnoy obespecheniya dlya resheniya gidrogeologicheskikh zadach [Development of software for solving the hydrogeological problems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 305(6):348–365. (in Russian)
- Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda – poroda*. T. 1. Sistema voda – poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravновесие, modelirovanie [Geological evolution and self-organization of the water–rock system. Vol. 1. The water–rock system in the Earth’s crust: interaction, kinetics, equilibrium, modeling]. Ed. S.L. Shvartsev. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2005. p. 244. (in Russian)
- Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Korneeva T.V. 2023. Formy migratsii khimicheskikh elementov v radonovykh vodakh yuga Sibiri [Forms of migration of chemical elements in radon waters of southern Siberia]. *Geologiya i mineralno-syryevye resursy Sibiri*. 2:81–90. (in Russian)
- Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A., Penigin A.V., Vakulenko L.G., Varaksina I.V., Zhukovskaya E.A. 2023. Geokhimicheskie posledstviya zakhoroneniya uglekislogo gaza v terrigennykh kollektorakh [Geochemical consequences of carbon dioxide burial in terrigenous reservoirs]. *Geologiya i mineralno-syryevye resursy Sibiri*. 56(4B):130–137. (in Russian)
- Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A., Penigin A.V., Varaksina I.V., Zhukovskaya E.A. 2023. O vozmozhnosti realizatsii proektov CCS v karbonatnykh kollektorakh Sibirskoy platformy [On the possibility of implementing CCS projects in carbonate reservoirs of the Siberian Platform]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. Inzhiniring georesursov. 334(8):68–78. (in Russian)
- Pitzer K.S. 1992. Termodinamicheskaya model plotnykh vodnykh rastvorov [Thermodynamic model of dense aqueous solutions]. In: *Termodinamicheskoe modelirovanie v geologii (mineraly, flyuidy, rasplavy)* [Thermodynamic modeling in geology (minerals, fluids, melts)]. Moskva, Mir, pp. 110–153. (in Russian)
- Prigozhin I., Defey R. 1966. Khimicheskaya termodinamika [Chemical Thermodynamics]. Novosibirsk, Nauka, p. 509. (in Russian)
- Khvashchevskaya A.A., Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Smetanina I.V., Chernykh A.V., Dultsev F.F. 2021. Rol sistemy “voda – poroda” v protsessakh formirovaniya sostava prirodnikh vod Sevastopolskoy gorodskoy aglomeratsii [The role of the “water–rock” system in the formation of the composition of natural waters of the Sevastopol urban agglomeration]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. Inzhiniring georesursov. 332(1):118–128. (in Russian)
- Dutova E., Nikitenkov A., Kuzevanov K. 2019. The HydroGeo Software Package and Its Usage. E3S Web of Conferences. 98:04005.
- Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Korneeva T.V., et al. 2025. Numerical Physicochemical Modeling of the Geochemical Behavior of Uranium and Thorium in Radon Waters of Southern Siberia. *Aquatic Geochemistry*. 31:6.
- Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A., Penigin A.V., Varaksina I.V., Zhukovskaya E.A. 2024. On the Possibility of Implementing CCS Projects in the Carbonate Reservoirs of the Siberian Platform. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 58(4):1283–1292.
- Novikov D.A. 2020. Hydrogeochemistry of authigenic mineral formation in Upper Jurassic sediments (the Nadym-Taz interfluvial area, Arctic regions of Western Siberia). *Applied Geochemistry*. 122:104704.
- Novikov D.A. 2022. Equilibrium modeling of water-gas systems in Jurassic-Cretaceous reservoirs of the Arctic petroleum province, northern West Siberia. *Petroleum Exploration and Development*. 49(2):363–373.