Термодинамические условия формирования подземных вод в лагунных отложениях нефтяных месторождений Сибирской платформы

Скворцов В.А.

Институт Земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, E-mail:skv@crust.irk.ru

АННОТАЦИЯ: Главная цель это установить с помощью физико-химического моделирования термодинамические условия (Т, Р, рН, Eh, С, соотношение раствор/порода и др.) формирования подземных вод, соленосных залежей и нефтематеринских пород, находящихся с ними в равновесии, в лагунах, на определенных стадиях осаднения. Эти исследования проводились впервые и выявили зависимость состава вод от литолого-минералогического состава пород в лагунах на стадии седиментогенеза и последующих постседиментационных преобразований. В результате проведенного моделирования удалось показать, что состав подземных вод оказывается чувствительным даже к незначительным изменениям в составе равновесных с ними водовмещающих пород в период постседиментационных преобразований в лагуне на начальной стадии осадочного нефтегазообразования.

Thermodynamic conditions of underground water formation in lagoon deposits of oil field of Siberian platform

Skvortsov V.A.

Institute of the Earth's Crust SB RAS. Irkutsk, Russia, E-mail:skv@crust.irk.ru

ANNOTATION: The main goal is to establish the thermodynamic conditions (T, P, pH, Eh, C, solution-rock ratio, etc.) for the formation of ground water salt deposits and oil bearing rocks, that are in equilibrium in lagoon at certain stages of deposits. The studies were conducted for the first time and revealed the dependence of water composition on the lithological and mineralogical composition of rocks in the lagoon at the stage of sedimentogenesis and post-sedimentation transformations. As result of modeling it was possible to show that composition of underground water is sensitive even to minor changes in the composition of the equilibrium water in the period of post-sedimentations in the lagoon at the initial stage of sedimentary oil formation.

ВВЕДЕНИЕ

На территории Сибирской платформы находится крупнейшая Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция, которая приурочена к Ангаро-Ленскому артезианскому бассейну [3] и одноименному прогибу. Прогиб является предгорным опусканием Байкальской складчатой области и выполнен лагунными отложениями кембрия. В нижнем кембрии территория Сибири была покрыта морем, в котором отлагались толщи известняков. К концу кембрия море обмелело, размеры его сократились, образовались лагуны, где накапливались отложения гипсов и солей. Гипсовая стадия предшествовала галитовой. В отложениях, сопряженных с разломами, формировались нефтяные ловушки. Особенностью строения Сибирской платформы является высокое положение фундамента и перекрывающих его отложений. Рифейско-фанерозойский вулканогенно-осадочный платформенный чехол имеет сложное многоярусное строение и достигает по результатам ряда исследователей [9] на отдельных участках мощности 10-12 км. Глубина фундамента в районе Катангской седловины 4000 м, Непско-Ботубинского свода 1500-1800 м, а в пределах Предпатомского прогиба более 4000 м. Лагунные отложения в основном представлены до-

ломитами с прослоями ангидрит-доломитов, ангидритов и доломитов гипсотизированных, известковистых, кремнистых и глинистых доломитов с органическим веществом. В нижней части разреза в доломитах повышена глинистость, в средней и верхней части разреза сульфатность.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фактическим материалом явились 350 проб, отобранные вместе со шлифами из всех разновидностей пород по скважинам из нефтяных месторождений и проанализированные с помощью (РКФА) рентгеновского количественного фазового анализа, состав морской воды [10] и кембрийская атмосфера [1]. Далее, на основе анализа минералов в породах месторождений, определялись зависимые компоненты и составлялась матрица природной модели нефтегазовых месторождений: Fe-Mg-Ca-K-Na-Al-Si-C-S-Cl-N-F-H-O [7], которая значительно отличается от экспериментальной модели C-H-N-O-S[2]. Исследования проводились с помощью термодинамического моделирования по программе Селектор-С [11]. Во время движений земной коры возникали морские волны, которые периодически заливали лагуну и при

взаимодействии морской воды с породами на дно опускались определенные глинистые осадки и формировались слои (свиты). Для каждой из свит и находящихся с ними на стадии седиментогенеза в равновесии подземных вод рассчитывались термодинамические условия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Формирование подземных вод, здесь, проходило в следующих условиях. Сибирская платформа в кембрии пребывала в южном полушарии, ниже экватора. Средняя температура воздуха доходила до 35 °С, атмосфера в то время была существенно азотная (N₂O-96%). Состав морской воды на протяжении всего геологического времени почти не менялся и представлял собой хлоридно-натриевый раствор. Фундамент в Байкальской складчатой области гранитный. Вблизи лагун с поверхности граниты выветривались: полевые шпаты разрушались, появилось большое количество глинистых минералов, граниты аргиллизировались и часть глинистых минералов попадала на дно лагуны.

Физико-химические условия образования отложений (свит) в лагуне и равновесных с ними на стадии седиментогенеза вод показаны ниже (табл. 1). На этом первый этап формирования вод в лагунах, связанный с осадконакоплением и эвапоритизацией в основном практически заканчивается и начинается второй этап.

Он обусловлен постседиментационной стадией, проявляющейся в лагунных отложениях (табл.2) связанный с началом метаморфизма пород нефтегазоносных бассейнов, что приводит к частичному изменению исходного состава пород и находящихся с ними в равновесии подземных вод, а также и к рассеиванию органики в нефтегазоносных толщах – доломитах глинистых катангской свиты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

О том какая же всё-таки зависимость наблюдается между литолого-минералогическим составом пород и находящихся в равновесии с ними подземных вод исследователи [4-6] и др. показывают в основном на первичных водах, ионный состав которых образовался в результате непосредственного выщелачивания соответствующих солей. Например, хлоридно-натриевые воды образуются при растворении галита, сульфатно-кальциевые – гипса, гидрокарбонатно-кальциевые – известняков, гидро-, карбонатно-магниево-кальциевые – доломита. Намного сложнее и не изученным остаётся вопрос о связи образования лагунных отложений и равновесных с ними подземных вод на стадии седиментогенеза и последующих постседиментационных преобразований в нефтегазовых ме-

сторожениях. Отложения катангской свиты - доломиты глинистые на стадии осадконакопления находились в равновесии с насыщенным хлоридно-натриевым рассолом. В период постседиментационной эволюции рассол выполнял функции гидролитического разложения и способствовал полному растворению из пород сульфатов (леонита и тенардита), слоистых водных силикатов (талька и монтмориллонита) и частичному карбонатов (кальцита и доломита). Высвободившиеся при растворении из монтмориллонита водород и карбонатный ион из доломита привели к количественному изменению минерального состава глинистого доломита и равновесного с ним крепкого гидрокарбонатно-хлоридного калиево-натриевого рассола. Нижнекембрийские соленосные отложения усольской свиты на стадии седиментогенеза находились в равновесии с хлоридно-натриевыми с примесью кальция и магния рассолами. В постседиментационный период состав доломитовых ангидритов, за счёт того что растворяются магнезит и сидерит, изменяется и в равновесии с ними устанавливается крепкий хлоридно-натриевый с примесью магния нейтральный рассол. Нижнекембрийские отложения ангарской свиты, на стадии седиментогенеза были в равновесии с хлоридно-натриевым с небольшим (около 6%-экв) содержанием кальция и гидрокарбоната рассолом, а на постседиментационной стадии, когда в ангидритовых известковистых доломитах произошло растворение гипса, в очень кислый хлоридно-натриевый с содержанием кальция (до 5%-экв) рассол.

Нижне-среднекембрийские отложения литвинцевской свиты на стадии седиментогенеза достаточно однородны и представлены гипсотицированными доломитами, которые в период своего образования находились в равновесии с хлоридно-натриевыми с небольшими количествами Mg (3%-экв), Ca (2%-экв) и SO₄ (1%-экв) рассолами. Во время постседиментационной стадии в составе доломитов произошли изменения: гипс полностью заместился ангидритом, водные калиево-магниево-сульфаты (леонит и шенит) растворились и в равновесии с новообразованными ангидритовыми доломитами оказались устойчивыми слабые хлоридные натрий-кальцево-магниево-кислые рассолы.

Верхнекембрийские отложения верхоленской и илгинской свит на стадии седиментогенеза, представленные песчаниками кварцево-слюдистыми на доломитово-сульфатном цементе, которые находились в равновесии с хлоридно-сульфатными натриевыми с незначительным

количеством гидрокарбоната рассолами. На постседиментационной стадии гипс, присутствующий первоначально в составе песчаников на стадии седиментогенеза, растворился и кальций ушёл на образование кальцита, изменились и соотношения между другими минералами: уменьшилось количество доломита, слюды, а увеличилось содержание ангидрида и за счёт выветривания и выщелачивания с бортов

лагуны из пород фундамента кварца и микроклина. Таким образом, на постседиментационной стадии здесь в равновесии с изменённым кварцево-слюдистым песчаником на карбонатном цементе оказываются слабые хлоридно-натриевые нейтральные с незначительным количеством кальция (6%-экв) и магнезия рассолы.

Таблица 1. Физико-химические условия формирования отложений и рассолов в лагуне

№№ п.п.	Соотношение, %		Физико-химические параметры			Последовательность отложения мине- ралов	Состав рассолов равновесных отложениями минералов
	Вода	Порода	Eh, В	pH	Плот- ность р- ра,г/см³		
Є2-3 Верхолёнская + Илгинская свиты (60-170) м. T=35 °С, P=0.1 МПа Песчаник кварцево-слюдистый на доломитово-сульфатном цементе							
1.	1.11	98.88	0.81	8.32	1.07	До(6)-Кв(30)-Ги(36)-Ге-Сл(20)-Анг(5)-Ле - Те	M66 $\frac{SO_4 89 Cl 110 HCO_3}{Na 100}$
Є1-2 Литвинцевская свита (172-318) м. T=35 °С, P=0.1 МПа Доломит гипсотизированный (210-235) м							
2.	9.01	90.96	0.85	7.20	1.03	Ги(22)-До(72)-Мнт-Ге-Кв(5)-Ле-Ше	M53 $\frac{Cl 99 SO_4}{(Na+K) 93 Mg 3 Ca 2}$
Є1 Ангарская свита (318-612) м. T=35 °С, P=0.1 МПа Ангидритовый известковистый доломит с галитом (515-530) м							
3.	3.75	96.24	1.02	4.31	1.30	Ги(8)-До(28)-Кв(2)-Ка(20)-Анг(32)-Ге- Га(10)	M184 $\frac{Cl 99 HCO_3}{(Na+K) 93 Ca 6}$
Є1 Усольская свита (1162-1527) м. T=35 °С, P=0.1 МПа. Доломитовый ангидрит с галитом							
4.	0.12	98.88	-0.07	6.21	1.20	До(37)-Ги-Сл(4)-Ге-Кв(2)-Анг(53)-Га(3)- Маг-Сид	M324 $\frac{Cl 100}{Na 98 Mg Ca}$
V Катангская свита (1654-1738) м. Доломит глинистый (1720-1725) м. T=35 °С, P=0.1 МПа							
5.	0.35	99.63	-0.29	7.89	1.32	До(66)-Мнт(12)-Та(2)-Кв(5)-Ле(5)-Ка(6)- Те-Га(2)-С-Анг-Пи	M350 $\frac{Cl 100}{(Na+K) 99}$
AR + PR Гранит аргиллизированный (1755-1780) м. T=35 °С, P=0.1 МПа							
6.	8.01	91.98	-0.91	13.62	3.05	Мнт(23)-Кв(26)-Ми(38)-Ал(11)-Вол	M56 $\frac{Cl 100}{Na 100}$

Таблица 2. Состав рассолов и равновесных минеральных ассоциаций пород на постседиментационной стадии

№ № п.п.	Фазы, в %			Eh, В	р Н	Содержание минералов в твердой фазе, равновесной с рассолом, в %	Формула состава рассола
	В	Г	Т				
Є 3Верхоленская- Илгинская свиты (0-172) м. Песчаник кварцево-слюдистый на карбонатном цементе							
1.	9		91	0.7	6.7		$M77 \frac{Cl100}{(Na + K)93Ca6Mg1}$
Є 1-2 Литвинцевская свита (172-318) м. Ангидритовый доломит							
2.	22		78	1.1	2.7	Анг(15)-До(59)-Кв(4)-Ге-Мнт	$M67 \frac{Cl97}{Mg38Ca35Na25}$
Є 1 Ангарская свита (318-612) м. Ангидритовый известковый доломит с галитом							
3.	23		76	0.9	4.4	Анг(32)-Ка(16)-До(23)-Га(4)-Кл	$M317 \frac{Cl99}{(Na + K)95Ca5}$
Є 1 Усольская свита (1162-1527) м. Доломитовый ангидрит с галитом							
4.	8		92	0.1	6.7	До(34)-Анг(51)-Ка(2)-Га(2)-Сл(3)-Ге	$M284 \frac{Cl100}{Na99Mg1}$
V Катангская свита (1654-1738 м). Доломит глинистый							
5.	40	0.06	59	-0.27	7.6	До(42)-Мнт(8)-Кв(4)-Ка(2)-С(3)-Пи	$CH_4 0.06M \frac{Cl55HCO_3 45}{Na62K37}$

Принятые сокращения: В – водная фаза; Г – газовая фаза; Т – твердая фаза, Ал – альбит, Анг – ангидрит, Вол – волластанит, Га – галит, Ге – гематит, Гм – гидромагнетит, Ги – гипс, До – доломит, Ка – кальцит, Кв – кварц, Ле – леонит, Маг – магнетит, Ми – микроклин, Мнт – монтмориллонит, Пи – пирит, С – углерод органический, Сид – сидерит, Сл – слюда, Та – тальк, Те – тенардит, Хл – хлорит, Ше – шенит

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе термодинамического моделирования удалось определить главные факторы, которые оказывают непосредственное влияние на зависимость равновесных рассолов от минералого-петрографического состава водовмещающих пород на разных стадиях их формирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вронский В.А., Войткевич Г.В. Основы палеогеографии. - Ростов на/Д: Феникс, 1997.- 576 с.
2. Зубков В.С. Термодинамическое моделирование системы С-Н-N-O-S в РТ- условиях верхней мантии.- Иркутск: Иркут. ун-т, 2005.- 180 с.
3. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангара-Ленского артезианского бассейна.- М.: Наука, 1966.- 322 с.
4. Посохов Е.В. Роль литолого-минералогического состава горных пород в формировании гидрохимических типов подземных вод. Гидрохимические материалы, т. 38.- Новочеркасск: Гидрохимический институт, 1964 а.- С. 106-116.
5. Посохов Е.В. Минералообразование как фактор метаморфизации природных вод. // Гидрохимические материалы, т. 38.- Новочеркасск: Гидрохимический институт, 1964 б.- С. 91-105.
6. Посохов Е.В. Формирование химического состава подземных вод (основные факторы). Издание 2-е дополненное и переработанное.-Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1969.- 334 с.
7. Скворцов В.А. Термодинамические условия образования подземных вод в Преображенском резервуаре Ерёминско-Чонского скопления нефти // Подземные воды Востока России. Материалы Все-

Результаты проведенных исследования показали, что процесс формирования подземных вод в лагунных отложениях на каждой стадии определяется вполне конкретным составом пород и реагирует даже на незначительные его изменения, что необходимо учитывать при дальнейших исследованиях.

- российского совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием), г. Новосибирск, 18-22 июня 2018 г. / Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Ин-т земной коры СО РАН, Сиб. отд-ние Росс. акад. наук и др. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018.- С. 446–452.
8. Скворцов В.А. Осадочно-миграционно-магматическая гипотеза образования нефти // Доклады РАН, 2019.- Т. 486, № 5.- С. 603-606.
9. Старосельцев В.С. Проблемные вопросы тектоники нефтегазоносных областей Сибири: Избранные труды.- Новосибирск: СНИИГиМС, 2006.- 248 с.
10. Хорн Р. Морская химия (структура воды и химия гидросферы) = Marine Chemistry (The structure of Water and the Chemistry of Hydrosphere).- М.: Мир, 1972.- 400 с.
11. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложение / ред. В.Н. Шарапов.- Новосибирск: Гео, 2010,- 283 с.