

Глубинные структурно-тектонические неоднородности земной коры и возможные процессы, связанные с нефтегазообразованием и нефтегазонакоплением (геохимический аспект)

Р.П.ГОТТИХ (Всероссийский научно-исследовательский институт геологических, геофизических и геохимических систем (ВНИИГеосистем); 117105, г.Москва, Варшавское шоссе, д.8), Б.И.ПИСОЦКИЙ (Институт проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН; 119991, г.Москва, ул.Губкина, д.3), В.И.ГАЛУЕВ, С.А.КАПЛАН (Всероссийский научно-исследовательский институт геологических, геофизических и геохимических систем (ВНИИГеосистем); 117105, г.Москва, Варшавское шоссе, д.8)

Показано, что по соотношению между различными группами микроэлементов средние составы нефти близки к составам базальтов, выплавляющихся в различных геодинамических обстановках. По комплексу геофизических и геохимических материалов представлена принципиальная схема формирования восстановленных флюидов в створе Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазообразования.

Ключевые слова: нефть, базальт, микроэлементы, флюид, земная кора.

Готтих Римма Павловна, rimgot@list.ru

Писоцкий Богдан Иванович, pisotskiy@list.ru

Галуев Владимир Иванович, Galuev@geosys.ru

Каплан Самуил Абрамович, lab6-vniigeosistem@yandex.ru

Structural Tectonic Heterogeneities Deep-seated in the Earth's Crust and Possible Processes Related to Oil and Gas Generation and Accumulation (Geochemical Aspects)

R.P.GOTTIKH, B.I.PISOTSKY, V.I.GALUEV, S.A.KAPLAN

It is demonstrated that the average composition of oil closely matches that of basalts, melted under various geodynamic settings, in the relationship between abundances of microelement groups. Based on the analysis of a combination of geophysical and geochemical data constructed is a schematic diagram showing generation of reduced fluids in the section of Yurubchen-Tahoma oil-and-gas accumulation zone.

Key words: oil, basalt, microelement, fluid, Earth's crust.

В настоящее время в области нефтяной геологии сложился ряд положений, позволяющих рассматривать процессы нефтеобразования и нефтенакпления на иной, чем прежде, основе. Во-первых, в связи с тем, что подавляющая часть нефтеносных провинций мира тяготеет к окраинам континентов (плит) и пространственно совмещается с подвижными поясами, на базе последних геодинамических представлений проводится реконструкция процессов формирования осадочных бассейнов. Во-вторых, это развитие концепции полигенеза нефтидов, предусматривающее различные сценарии образования скоплений углеводородов в пределах осадочных депрессий земной коры. Рассматриваются преимущественно механизмы генерации углеводородов в условиях субдукционно-обдукционных и рифтогенных. Несмотря на то, что значительная часть геологов придерживается биогенной концепции нефтидогенеза, практически всеми признается необходимость привлечения эндогенного фактора для мобилизации микронепти в скопления: воздействия на породный субстрат глубинных флюидов, представляющих собой

или газовые эманации высокостоящих астенолинз, или эманации внедряющихся в консолидированную кору магматических расплавов. Некоторые исследователи в качестве мобилизующего агента рассматривают подъем апокатагенных или метаморфогенных газов из нижних горизонтов глубоких осадочных бассейнов. Без признания участия глубинных эманаций трудно представить формирование крупных зон локализации в осадочных депрессиях скоплений нефти и газового конденсата.

Что же представляют собой эти глубинные флюидные эманации, каков может быть их источник и роль в формировании углеводородных скоплений? Данные вопросы являются предметом настоящих исследований. Ответ на них авторы пытаются найти путем комплексного анализа геохимических материалов с данными геофизических исследований на опорных профилях, применительно к крупной зоне нефтегазообразования на юге Сибирской платформы.

Для выяснения источников вещества, образующегося в тех или иных геологических процессах, обыч-

но используют геохимию малых элементов, позволяющую судить о природе процесса и характере взаимодействия систем с окружающей средой. С целью проведения такого анализа авторы на протяжении ряда лет исследовали геохимические особенности смолисто-асфальтовых фракций нефти различных регионов с использованием метода ISP-МС в комплексе с нейтронно-активационным анализом.

Использование высокочувствительных методов анализа показало, что в нефти фиксируются практически все элементы периодической таблицы. В табл. 1 приведены средние содержания некоторых микроэлементов, соотношения между которыми будут рассматриваться в статье. Анализ геохимической специализации нефти выявил обогащенность ее смолисто-асфальтовых компонентов по отношению к кларку для верхней коры ле-

1. Средние значения содержаний некоторых микроэлементов в смолисто-асфальтовых компонентах нефти различных регионов (в мг/т)

Макро-элементы	Восточная Сибирь	Днепровско-Донецкая впадина	Западная Сибирь	Южно-Татарский свод	Тимано-Печорская провинция	Шельф Сахалина
Sc	130,0	300,0	103,0	102,0	166,0	127,9
Ti	2061,0	9724,0	3545,0	5243,0	3241,0	4246,2
V	6109,0	28 370,0	26 190,0	227 600,0	61 635,0	7824,4
Cr	12 883,0	5985,0	13 207,0	10 835,0	18 380,0	5970,1
Mn	724,0	955,0	2965,0	1728,0	1435,0	985,5
Co	67,0	87,0	101,0	207,0	208,0	651,8
Ni	14 890,0	19 027,0	23 328,0	72 016,0	56 170,0	20 271,2
Cu	11 974,0	6105,0	15 180,0	31 283,0	51 804,0	4633,0
Ga	17,7	26,3	14,4	157,0	100,7	93,6
Rb	37,3	35,2	76,0	79,3	62,5	41,5
Sr	1033,0	6657,0	2270,0	2850,0	1425,0	846,5
Y	10,4	11,1	20,2	16,9	21,7	15,3
Zr	547,0	1275,0	328,0	352,0	605,0	381,0
Nb	5,0	2,7	8,3	13,5	9,9	9,0
Mo	171,0	45,6	58,0	1600,0	315,8	47,8
Pd	0,9	4,3	2,6	3,3	2,5	2,3
Ag	330,0	17 000,0	65,0	322,0	630,0	133,4
Cd	129,0	46,0	46,5	180,0	403,0	77,5
Cs	1,2	0,6	5,7	2,3	1,9	1,4
Ba	2578,0	4147,0	4423,0	2084,0	5600,0	1941,4
REE	96,0	136,0	180,0	170,0	182,0	189,3
Hf	3,5	31,6	7,0	8,3	6,0	12,1
Ta	0,7	0,7	0,1	1,0	0,6	Н/о
W	82,0	20,0	80,0	61,6	176,0	12,2
Re	3,	4,5	3,1	51,9	5,4	2,4
Pt	0.5	1,1	0,5	0,5	1,4	0,5
Au	102,0	350,0	7,1	98,4	60,0	5,8
Tl	1,4	1,6	1,9	1,7	2,1	5,7
Pb	2248,0	1130,0	16 530,0	2009,0	4758,0	845,7
Bi	30,5	17,1	29,0	133,0	100,0	34,9
Th	3,3	15,0	6,2	5,2	6,0	4,9
U	3,2	3,0	4,2	16,0	12,0	3,5

тучими халькофильными элементами (Hg, As, Sb, Se, Te, Cd, Ag, Au), выборочно — V, Cu, Re, Ni, близки к коровым концентрации Cr, Zn, Pb, Bi [4]. Вместе с тем, наряду с общими закономерностями, наблюдаются различия в микроэлементной специализации нефти регионов, что отражено на ряде дискриминационных диаграмм (рис. 1, А и Б) [4]. Выявленные закономерности могут отражать геохимические особенности геологической среды, формировавшейся при протекании в регионах разновременных геодинамических процессов, в т.ч. с участием магматитов различного профиля и сопутствующих им флюидов.

В связи с тем, что базальты в наибольшей степени отражают геодинамическую обстановку образования коры, авторы на измененную для нефти диаграмму Дж.Пирса и Дж.Каннома [30] нанесли средние составы изученных проб нефти (см. рис. 1, В). Кроме того, на диаграмму нанесены и данные по трем пробам нефти сахалинского шельфа и по битумоидам из толщ, обогащенных органическим веществом (баженовская свита, доманиковский, вздрешевский и ирэмэкэнский горизонты). Как следует из рис. 1, нефти Днепровско-Донецкой впадины и Восточной Сибири попадают в область развития внутриплитных базальтов, Тимано-Печорской провинции — известково-щелочных базальтов, Западной Сибири — толеитов и известково-щелочных базальтов, Южно-Татарского свода — толеитовых базальтов и, наконец, нефти сахалинского шельфа ложатся в область развития островодужных толеитов и известково-щелочных базальтов. Точки, отвечающие составам битумоидов из предполагаемых «нефтематеринских» свит, резко сдвинуты по отношению к нефти соответствующих регионов. Отмеченные закономерности в общем виде дают представление о геологическом развитии рассматриваемых регионов [28]. Так, зна-

чительная часть домезозойского фундамента Западной Сибири формировалась при участии породных комплексов островных дуг Палеоазиатского океана с последующим наложением на них основного магматизма в пределах позднепермских и триасовых рифтов. В пределах рифтовой Днепровско-Донецкой впадины (глубины отбора проб 4 км) и Непско-Ботуобинской и Байкитской антеклиз Сибирской платформы был развит внутриплитный магматизм среднедевонского и пермо-триасового возрастов, соответственно. В геологических разрезах востока Восточно-Европейской платформы (Волжский блок) фиксируется среднедевонский основной магматизм толеитовой серии, а в Северо-Восточно-Сахалинском бассейне (Пильтун-Астоская, Южно-Дагинская, Мирзоевская площади) — известково-щелочной островодужный. Наибольший разброс состава отмечается для нефти Тимано-Печорского региона в связи с развитием на данной территории ансамбля разнообразных структурно-тектонических элементов, вмещающих скопления нефти, и проявления магматических процессов [28]. Таким образом, положение точек, отвечающих составу нефти различных регионов, на диаграмме Пирса-Каннома представляется вполне закономерным.

Приведенные материалы геохимических исследований нефти и ранее выполненные работы позволяют очертить некоторые признаки участия эндогенного вещества в процессах нефтеобразования и нефтенакпления. К части таких признаков относятся:

присутствие в нефти значительных концентраций летучих халькофильных и рассеянных элементов, присущих газовым эманациям магм основного и ультраосновного состава (Hg, Au, Ag, Cu, Re, Se, As и др.), количество которых иногда на 1—3 порядка превышает кларк для земной коры;

идентификация в нефти элементов платиновой группы, среди которых преобладающим является палладий. Наличие, наряду с платинидами, Cr, Cu, Ni, Co может отражать металлогеническую особенность платформенных гипербазитов, характеризующихся сходной медно-никелевой палладиевой специализацией [19];

наличие в нефти высокозарядных и крупноионных литофильных элементов (U, Th, REE, Zr, Rb, Ba и др.), характерных для щелочных, щелочно-ультраосновных породных комплексов и гранитоидов, отражающих специализацию обогащенного источника;

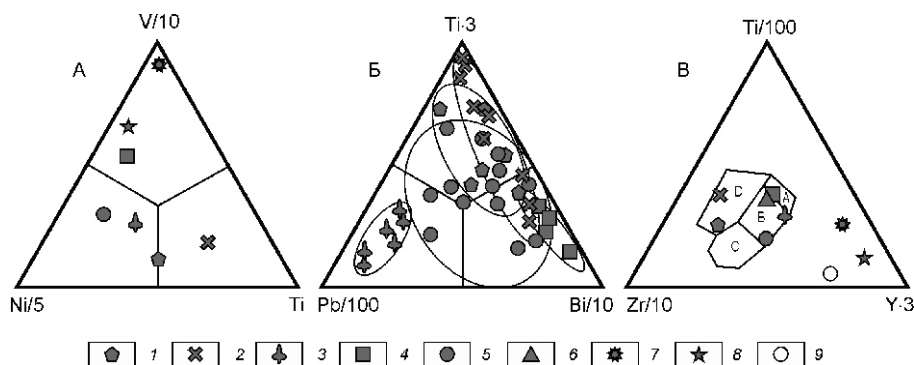


Рис. 1. Дискриминационные диаграммы: Ni—V—Ti (А), Pb—Тl—Bi (Б) и Zr—Ti—Y (В) [30] для средних составов нефти и битумоидов органического вещества пород:

нефть: 1 — Восточной Сибири, 2 — Днепровско-Донецкой впадины, 3 — Западной Сибири, 4 — Южно-Татарского свода, 5 — Тимано-Печорской провинции, 6 — шельфа Сахалина; битумоиды: 7 — баженовской свиты верхней юры, 8 — доманиковского горизонта верхнего девона, 9 — вздрешевской и ирэмэкэнской свит верхнего рифея; составы базальтов: А — толеиты островных дуг, В — островодужные толеиты, известково-щелочные базальты, С — известково-щелочные базальты, D — внутриплитные базальты континентов

резкое отличие хондритнормализованных спектров распределения лантанидов нефти от аналогичных спектров, присущих вмещающим породам, пластовым водам и органическому веществу биогенной природы [2];

согласованность средних составов нефти на диаграмме Ti—Zr—Y с составами базитов различных геодинамических обстановок формирования коры рассматриваемых регионов;

наличие в геологических разрезах нефтегазоносных территорий следов восходящей миграции восстановленных флюидов в виде многофазных вторичных включений, законсервированных в мельчайших трещинках пород и минералов, термобарические характеристики которых позволили сделать вывод о формировании флюидов вне осадочного чехла и поступлении их в чехол уже после завершения катагенных преобразований пород. Отличительной особенностью флюидов является наличие в их битуминозной фазе широкого спектра микроэлементов, соответствующих спектру микроэлементов в нефти [3].

Сравнение геохимических особенностей восстановленных флюидов, законсервированных в виде вторичных и первично-вторичных включений в кварце гранитов фундамента Верхнечонской площади Непско-Ботуобинской антеклизы, и в эвдиалите из эгирин-нефелин-эвдиалитового шпирового пегматита трахитоидных хибинитов Хибинского щелочного массива, дало возможность авторам выявить их практическую идентичность по составу, заключающуюся в транспортировке широкого круга элементов (табл. 2). Эндогенная природа жидкой углеводородной фазы включений в эвдиалите, сформированная за счет серии реакций в послемагматическую стадию становления массива, не вызывает сомнений. Анализ битумоидов из включений показал, что жидкие восстановленные компоненты наследуют геохимическую среду кристаллизации минералов, а накопление микроэлементов происходило одновременно с процессами синтеза и каталитической поликонденсации восстановленных газов в стабилизирующемся кристалле эвдиалита. Продукты этих превращений и стали органическими лигандами для образования сложных элементоорганических соединений, состав которых определялся характеристикой образующихся битумоидов, химическим составом среды кристаллизации минералов и свойствами микроэлементов [5].

Идентичность геохимических характеристик флюидов позволяет предполагать, что синтез битуминозных компонентов в восстановленных флюидах, поступающих в породы фундамента и осадочного чехла нефтегазоносных бассейнов, мог осуществляться по сценарию, близкому к синтезу битумоидов из пегматитов и постмагматических образований Хибинского массива. Однако содержание микроэлементов в составе битумоидов включений в кварце из гранита фундамента Верхнечонской площади в целом при-

2. Содержания микроэлементов (в г/т) в битумоидах включений в кварце гранита Верхнечонской площади Сибирской платформы (1) и в эвдиалите пегматита трахитоидных хибинитов (2)

Микро-элементы	Пробы	
	1	2
Ti	0,41	11,976
V	0,200	38,290
Cr	0,241	2,969
Mn	0,157	12,230
Fe	8,730	14,610
Co	0,009	0,505
Ni	0,411	20,577
Cu	3,007	33,278
Zn	2,753	49,350
Ga	0,009	0,217
Rb	0,008	0,118
Sr	0,084	2,873
Y	0,002	0,648
Zr	0,068	14,030
Nb	0,003	0,812
Mo	0,004	0,264
Cs	0,0002	0,007
Ba	0,237	5,727
La	0,016	0,819
Ce	0,024	1,499
Pr	0,002	0,155
Nd	0,006	0,532
Sm	—	0,121
Eu	—	0,037
Gd	—	0,117
Tb	—	0,023
Dy	—	0,148
Yb	—	0,079
Lu	—	0,011
Hf	0,002	0,308
Ta	0,0004	0,064
W	0,007	0,176
Re	0,009	—
Au	0,030	—
Hg	0,607	—
Tl	0,013	0,075
Pb	0,139	2,452
Bi	0,004	0,047
Th	0,007	0,059
U	0,004	0,135

Примечание. Прочерк — содержание элемента ниже предела обнаружения или элемент отсутствует.

мерно на два порядка ниже, чем в битумоиде включений в эвдиалите, что особенно ярко выражено для элементов щелочного парагенезиса: Y, Nb, Ta, Hf, TR, Zr. В эту же группу входит и ванадий — элемент наиболее характерный для нефтяных систем. На общем фоне пониженных концентраций элементов наблюдается относительное обогащение «нефтяных» битумоидов Cr, Cu и особенно летучими Tl, Bi. Обнаружены в относительно значимых количествах Re, Au, Hg. Полученный материал может свидетельствовать о ряде отличий в источниках флюидов. Если носителями углерода и редких элементов в породах Хибинского массива безусловно выступали флюидные системы остывающих ультращелочных магм, то в нефтегазоносных провинциях, по крайней мере в пределах Лено-Тунгусской, скорее всего мы сталкиваемся с эманациями кристаллизующихся основных—ультраосновных расплавов или основных расплавов повышенной щелочности. Не исключен вариант и наследования флюидными системами геохимической специализации вмещающей среды, сформированной за счет более ранних эндогенных процессов. Различия между вышеописанными флюидными системами могут заключаться еще и в том, что если «хибинские» углеродсодержащие восстановленные флюиды сингенетичны вмещающим породам, то «нефтегазоносные» — вторичны, приурочены к трещинному пространству пород и источник их значительно удален от мест локализации.

Исходя из предложенной логики рассмотрения материалов обратимся к геохимии основных магм, проявляющихся в различных геодинамических обстановках и общей характеристике магматогенных флюидов на основе данных, полученных при изучении расплавных включений в минералах и закалочных стеклах базальтов [12]. Для сравнения выбраны геохимические данные по объектам трех геодинамических обстановок: зон спрединга, островных дуг и активных континентальных окраин и внутриконтинентальных рифтов.

Результаты исследований состава летучих компонентов базальтов, приведенные в табл. 3, фиксируют наименьшие концентрации газов в магмах срединно-океанических хребтов, что согласуется с представлениями о деплетированности их источников. В наибольшей степени обогащены летучими расплавы континентальных внутриплитных обстановок, что, по-видимому, связано с их выплавлением из обогащенной мантии. Высокие содержания H_2O в расплавах островных дуг обусловлены процессами рециклинга воды в зонах субдукции [12, 15, 23]. Вместе с тем следует отметить, что содержание углекислоты и серы во включениях значительно занижено. Углекислота, как один из слабо растворимых в магмах компонентов, покидает одной из первых кристаллизующиеся расплавы в ходе магматической деятельности любого типа, что и нарушает значимую корреляцию со-

держаний CO_2 , K_2O и P_2O_5 в базальтах. В процессах дифференциации в магматических сериях всех обстановок происходит и уменьшение концентрации серы, что связано как с образованием сульфидных фаз и их отсадкой в более ранних основных—ультраосновных выплавках, так и с интенсивной дегазацией серы в виде H_2S и SO_2 [12, 23].

Обобщение данных по изучению термодинамических характеристик флюидных включений, сингенетичных с расплавными, показало, что их температуры (температуры гомогенизации включений) изменяются в пределах от 20—100 до 800—1400 С с преобладанием значений ниже 500 С. В указанном диапазоне температур давления флюидов составляют 0,1—1300 МПа [24], причем реальные значения давлений флюидов часто значительно превосходят величину не только гидростатической, но и литостатической нагрузки [22]. Эти данные позволяют допустить, что избыточное давление обусловлено поступлением

3. Содержания флюидных компонентов и фосфора в базальтах различных геодинамических обстановок

Компоненты	Геодинамическая обстановка	Содержания, %		
		Средние	Макс	Мин
H_2O	СЗ	0,43	0,97	0,130
	ОД АКО	2,08	3,77	0,800
	КР	1,65	4,55	0,440
Cl	СЗ	0,03	0,08	0,003
	ОД АКО	0,11	0,25	0,049
	КР	0,21	0,32	0,036
F	СЗ	0,02	0,07	0,006
	ОД АКО	0,17	0,35	0,005
	КР	0,37	1,25	0,353
S	СЗ	0,11	0,21	0,058
	ОД АКО	0,13	0,38	0,018
	КР	0,09	0,32	0,028
CO_2	СЗ	0,02	0,12	0,005
	ОД АКО	0,04	0,43	0,003
	КР	0,17	0,57	0,051
P_2O_5	СЗ	0,15	0,42	0,050
	ОД АКО	0,18	0,91	0,030
	КР	0,58	2,18	0,160

Примечание. СЗ — зоны спрединга; ОД АКО — островных дуг и активных континентальных окраин; КР — внутриконтинентальных рифтов.

флюида из глубинных участков земной коры в связи с тектономагматической активизацией регионов.

Естественно, что в таком большом диапазоне температур и давлений состав флюидов не остается постоянным: при высоких температурах (выше 700 С) и высоких давлениях (400 МПа) преобладают преимущественно безводные (CO₂, CH₄, N₂, CO, H₂S) флюиды. При температурах ниже 600 С и давлениях 400 МПа (гипабисальный уровень становления магматических очагов) преобладают гетерофазные флюиды, представленные фазой высококонцентрированных растворов со значительным содержанием хлоридов различных элементов и парогазовой фазой [24].

При миграции таких флюидов за пределы магматического очага наблюдаются разные сценарии эволюции их фазового состояния и соотношений между компонентами, определяющиеся изменением *PT*-параметров, реакциями среди газовых составляющих и окислительно-восстановительным состоянием вмещающей среды, задающей фугитивность кислорода в самих флюидах. В общем виде по данным почти 6000 определений состава газовой фазы включений методом раман-спектроскопии выведен средний ее состав (в %): CO₂ — 61,46; CH₄ — 19,23; N₂ — 16,18; H₂S — 2,17; C_nH_m — 0,72; H₂O — 12; CO — 0,12 [24], а с учетом содержания воды: H₂O — 70,3; CO₂ — 21,4; CH₄ — 6,3; N₂ — 2,0; H₂S — 0,07 [20].

Помимо разницы в составе флюидных компонентов базальты различных геодинамических обстановок отличаются и в геохимическом отношении, наследуя состав источника плавления. Различия в составах источников базитов срединно-океанических хребтов (деплементированная мантия), океанических островов и плато (мантия океанических плюмов), внутриплитных континентальных обстановок (мантия континентальных плюмов), островных дуг и активных континентальных окраин подтверждаются данными по составам примитивных стекол [14, 15, 23]. Наиболее высокие содержания некоторых высокозарядных, крупноионных и транзитных элементов наблюдаются в базальтах внутриконтинентальных рифтов (табл. 4). В свою очередь базальты спрединговых зон по отношению к базальтам островных дуг и активных континентальных окраин обогащены Ti, Y, Zr, Nb, REE, Hf, Sc, Ni, Cu, но обеднены Pb, Th, U, V, Cr, Co и особенно крупноионными Cs, Rb, Sr, Ba. Таким образом, основные магмы различных геодинамических обстановок отличаются как специализацией флюидного, так и геохимического составов. В аспекте рассматриваемых вопросов важно то, что пузырьки гипабисальных гетерофазных флюидов хорошо экстрагируют из расплавов различные элементы-примеси и рудные компоненты и, соответственно, несут геохимическую информацию об источнике [9, 18].

По аналогии с базальтами [13], в публикации [6] выведены некоторые отношения элементов-примесей в нефти, которые также могут отражать источники вещества, участвующие в формировании углеводород-

ных скоплений. Данные табл. 5 показывают наличие отчетливой тенденции увеличения величины всех рассматриваемых отношений в нефти Днепровско-Донецкой впадины и Восточной Сибири относительно нефти других регионов, хорошо согласующееся с увеличением их в базальтах континентальных рифтов по сравнению с магмами других обстановок. Исключение составляет Zr/Nb. Можно предполагать, что противоположная тенденция в изменении этого параметра обусловлена как предпочтительным накоплением ниобия в базальтах внутриконтинентальных рифтов, так и пониженной склонностью его перехода во флюидную фазу по сравнению с цирконием.

Приведенные геохимические материалы позволяют прийти к заключению об участии в процессах нефтеобразования и нефтенакпления эндогенной составляющей, а сами процессы должны отразиться в структуре и вещественном составе коры под крупными скоплениями углеводородов.

4. Содержания некоторых микроэлементов в базальтах различных геодинамических обстановок (в г/т)

Микро-элементы	Геодинамические обстановки		
	СЗ	ОД АКО	КР
Ti	7679,0	5339,6	7613,7
Y	26,6	15,4	20,7
Zr	85,4	32,6	417,0
Nb	3,1	1,3	32,2
REE	50,3	25,3	210,3
Hf	2,2	1,3	3,1
Pb	0,7	2,2	3,2
Th	0,3	0,5	5,2
U	0,1	0,2	1,2
Sc	37,6	27,3	17,3
V	268,0	317,0	—
Cr	303,0	414,0	478,0
Mn	1316,5	1394,0	1161,6
Fe	84 312,0	78 733,4	54 962,9
Co	43,6	48,2	160,0
Ni	90,5	65,4	639,0
Cu	74,7	43,0	—
Zn	80,8	—	—
Cs	0,03	1,1	12,0
Rb	1,7	14,2	147,0
Sr	131,0	267,0	1250,0
Ba	18,6	90,3	2800,0

5. Отношение некоторых элементов в базальтах различных геодинамических обстановок и нефти

Геодинамические обстановки и нефти	Zr/Y	Zr/Nb	Zr/REE	Zr/Co
<i>Геодинамические обстановки</i>				
ОД АКО	2,1	25,7	1,3	0,7
СЗ	3,2	27,3	1,7	2,0
КР	20,1	12,9	2,0	2,6
<i>Нефти регионов</i>				
Днепро-Донецкая впадина	115,0	470,0	9,4	14,6
Восточная Сибирь	51,0	109,0	6,0	8,2
Западная Сибирь	16,0	40,0	2,0	3,2
Южно-Татарский свод	21,0	26,0	2,0	0,6
Шельф Сахалина	25,0	42,0	2,0	0,6

Действительно, геофизические работы последних лет, проведенные в районах размещения месторождений углеводородного сырья, показали существование устойчивой корреляции между положением мантийных и коровых аномальных сейсмических доменов с районами размещения залежей углеводородов в осадочном чехле и отсутствие аномальности вне областей локализации скоплений нефти и газового конденсата [1].

В работе [7] рассмотрена модель пространственной совмещенности аномального строения консолидированной земной коры в геологическом разрезе Камовского свода Байкитской антеклизы Сибирской платформы с крупнейшей Юрубчено-Тохомской зоной нефтегазонакопления в осадочном чехле. На сейсмоэнергетическом разрезе отрезка профиля СБ-1 земная кора под Юрубчено-Тохомской зоной значительно дифференцирована, что особенно выражено на глубинах 20—40 км (рис. 2, Б). Данные магнитотеллурического зондирования фиксируют в средней коре на уровне кровли сейсмических аномалий (22—25 км) относительно проводящий слой, разделяющий наиболее высокоомную верхнюю и нижнюю кору. На флангах профиля приведенные контрастные геофизические характеристики консолидированной земной коры не отмечаются. В створе профиля Ямал—Кяхта, пересекающего Камовский свод в юго-восточном направлении и проходящего через Куюмбинское месторождение углеводородов (см. рис. 2, А), на близких рассмотренным глубинам, хорошо выделяется приподнятый высокоскоростной домен в низах консолидированной коры (см. рис. 2, В).

По периферии приподнятого блока (V_p 6,63—7,12 км/с) скорости распространения продольных сейсмических волн существенно ниже — 6,38 и 6,40 км/с в северо-западной и юго-восточной частях профиля, соответственно (см. рис. 2, В).

Комплексный анализ истории развития земной коры Тунгусской гранит-зеленокаменной области, вообще, и Байкитской антеклизы, в частности, и данных геофизических исследований позволил сделать вывод о том, что строение коры отражает совокупное проявление процессов ее формирования в архейско-раннепротерозойское время и последующего преобразования в результате разновременного внедрения магм. Наибольший вклад обусловлен воздействием на литосферу пермско-триасового плюма, приведшего к массовому выносу из мантии расплавленного материала с консервацией его большей части в пределах континентальной коры. Выявленная на профилях глубинная сейсмическая неоднородность может быть следствием многостадийности ее формирования при участии базит-гипербазитовых интрузий, для которых характерна расслоенность магматических комплексов, возникающая в результате периодического, многократного поступления в промежуточную камеру свежих порций расплава и смешения их с ранее внедренной магмой [27]. В связи с этим процессом интрузивные комплексы постоянно увеличиваются в объеме и их конечный размер в значительной степени определяется длительностью существования данной магматической системы и возможностью последующего наложения унаследованных эндогенных событий. На сейсмических разрезах подобные области могут выражаться в виде интенсивных горизонтальных пакетов отражения волн, обусловленных неоднородностью состава пород и наличием между ними резких контактов. Расслоение базит-ультрабазитовых расплавов ведет к возрастанию в породах кровли массивов железистости минералов вплоть до образования ферродиоритов, ферробазальтов [27]. В случае повышенной флюидонасыщенности расплавов при понижении температуры их кристаллизации происходит также отгонка рудных компонентов вместе с газовыми составляющими в купольные зоны интрузий, где эти компоненты образуют рудные скопления или входят в виде примесей в силикатные минералы. Отражением таких процессов и является наличие на глубинах 22—25 км высокопроводящего слоя пород. Существенным фактом, понижающим электрическое сопротивление пород и играющим значительную роль в формировании состава постмагматических флюидов, является наличие в этой зоне графита. Архейские породные комплексы всегда содержат графит, который при внедрении в кору магм мобилизуется вследствие слабой растворимости в расплавах и концентрируется в створе интрузивных тел в виде непрерывных межзерновых пленок пород. Принципиальная схема расслоенных магматических

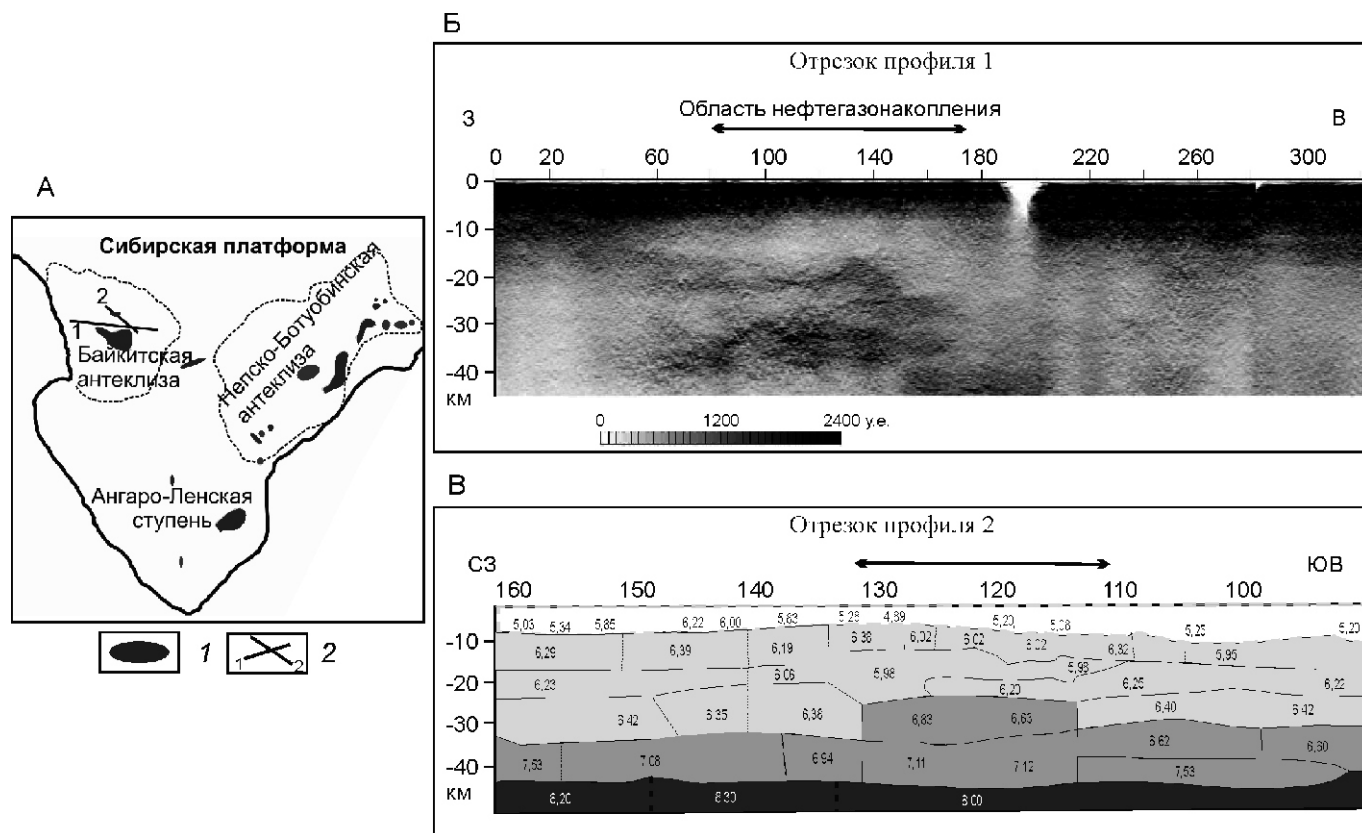


Рис. 2. Аномальное строение консолидированной земной коры в створе области нефтегазоаккумуляции по геофизическим данным:

А — основные структурно-тектонические элементы II порядка юга Сибирской платформы: 1 — скопления углеводородов и 2 — положение отрезков сейсмических профилей в пределах Куюмбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазоаккумуляции; Б — сейсмоэнергетический разрез консолидированной земной коры Камовского свода по отрезку профиля СБ-1(1 на рис. А); обработка материалов МОВ ОГТ, ВНИИГеосистем; В — скоростной разрез консолидированной земной коры по отрезку профиля ГСЗ Ямал—Кяхта (2 на рис. А); обработка материалов «Нефтегеофизика», 1985 и ВСЕГЕИ, 2009; вверху — область локализации Куюмбинского месторождения

комплексов с элементами послемагматических изменений представлена на рис. 3, А.

В связи с тем, что мощная литосфера Сибири не давала возможности полного транзитного излияния формирующимся магматическим расплавам ранне-триасового времени, последующее поступление в промежуточные очаги флюидов могло приводить к ощелачиванию магм и обогащению их некогерентными элементами. Данный процесс привлекается для объяснения наблюдаемой перемежаемости толеитовых и субщелочных базальтов в пределах Сибирской платформы [10]. Летучие компоненты как и солевые (галоидные, карбонатные, сульфидные и др.) составляющие магм, почти не входят в состав минералов и по мере кристаллизации последовательных инъекций расплавов расходуются на метасоматические преобразования уже стабилизированных масс и в основном накапливаются в остаточных расплавах купольных зон. Знание состава магмогенных флюидов, рассмотренных выше, позволяет расширить ха-

рактеристику минералообразующих флюидов с помощью аппарата термодинамики. Так, вода и углекислота, отделяющиеся после насыщения кристаллизующихся отступающих магматических очагов при T 750—700 С и P 1100—1000 МПа приводят к амфиболитизации пород нижних горизонтов ранее внедрившихся ультрабазитов [26]. Основным минералогическим следствием процесса метасоматического преобразования пород при дальнейшем снижении температуры флюидов является новообразование малоплотных куммингтонита, монтмориллонита, слюд и, наконец, серпентина. Все эти процессы, как следует из рис. 3, А, приводят к выделению водорода, который мог получаться в достаточно широком диапазоне температур на завершении и после завершения магматического процесса. Накопление флюидных компонентов в верхних зонах интрузий при кристаллизации силикатных расплавов не беспредельно: растворимость воды может достигать 9—12%, а углекислоты — 0,5—4% [8]. С падением температуры

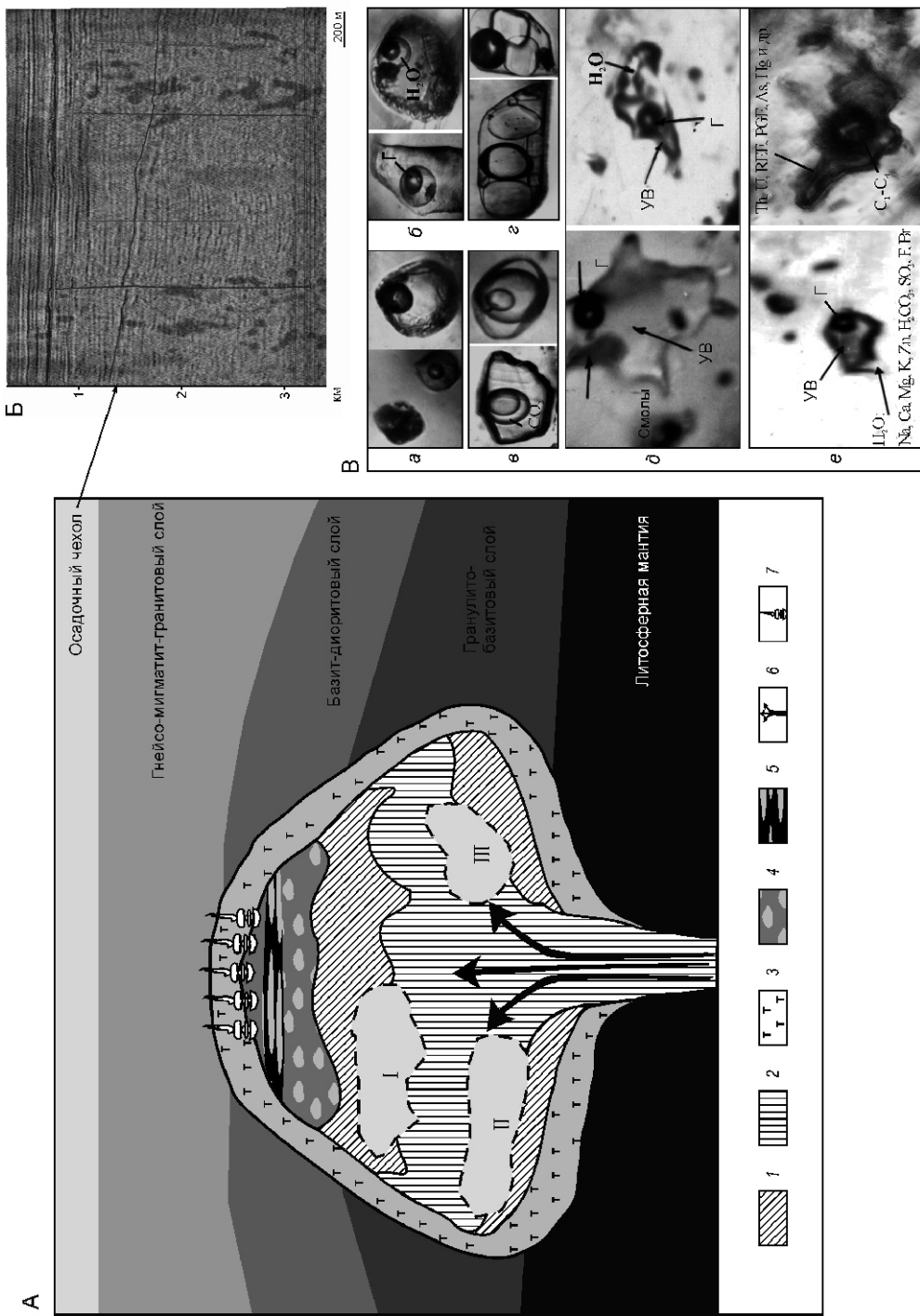


Рис. 3. Принципиальная модель формирования глубинных флюидных «нефтеобразующих» систем в геологическом разрезе Куюбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазоаккумуляции:

А — эволюция флюидного режима кристаллизующихся многофазовых базит-гипербазитовых интрузий в разрезе консолидированной коры: 1—2 — последовательные стадии внедрения расплава; 3 — зона эндоконтакта; 4 — область флюидизированных расплаво-расплавов; 5 — зона магнетит и графитосодержащих пород (область каталитического синтеза углеводородов); 6 — пути поступления расплава и флюидов из промежуточных магматических глубинных очагов; 7 — зоны контракционных трещин (пути выноса продуктов синтеза газовых компонентов); области послемагматических изменений пород с некоторыми минеральными новообразованиями: I — серпентинизация, II — амфиболитизация, монтмориллонитизация, антофилитизация, III — биотитизация; Б — зоны трещинового и рифейских складчатых породных комплексах по данным сейсмолокации бокового обзора [21, 25]; В — элементы эволюции флюидно-силикатных систем при кристаллизации и декомпрессии интрузивных базит-ультрабазитовых комплексов по данным изучения расплавленных и флюидных включений в породах; включения в породах и минералах: а — расплавленные силикатные с газовой фазой и б — высокоплотной магматической жидкостью; флюидные: в — многофазные с жидкой углекислотой и г — гетерофазные расплаво-расплавленные с дочерними кристаллами (фото В.Б.Наумова и др., 2009); д — углеводородно-водные и углеводородные с жидкой нефтеподобной субстанцией; е — геохимический состав водно-солевой (H₂O), жидкой нефтеподобной (УВ) и газовой (С₁—С₄) фаз восстановленных флюидов

(ретроградное кипение) происходит отделение флюидов, фазовое состояние, значение окислительно-восстановительного потенциала и состав которых во многом определяются уровнем глубинности очагов и спецификой трансформации при взаимодействии с окружающими породами. В рассматриваемом случае синтез сначала простых восстановленных соединений может происходить в средней консолидированной коре, в зоне развития магнетитсодержащих пород с примесью меди, висмута и других переходных металлов. Здесь же могли образовываться и дополнительные порции водорода при реакциях воды с восстановленными формами железа. При снижении температуры флюидов в процессе их восходящей миграции образуются и более сложные углеводороды. Наиболее распространенная точка зрения об элементах abiогенного образования восстановленных флюидных компонентов сводится к процессу гидрирования оксидов углерода водородом. Реакции осуществляются в широком диапазоне температур и повышенном давлении в присутствии катализаторов на основе переходных металлов VIII группы. Синтез нефтеподобных веществ можно рассматривать как восстановительную олигомеризацию оксида углерода: $n\text{CO} + m\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$ [16]. Конечные продукты в общем виде представлены алканами, алкенами и гетероциклическими соединениями, состав которых определяется природой катализатора, соотношениями атомов в системе C—O—H и условиями синтеза. Каталитический процесс характеризуется крайней сложностью, содержит большое число последовательных и параллельных превращений, включающих или конденсационный, или полимеризационный путь роста цепи [16]. Параллельный или несколько сдвинутый по времени синтез углеводородов, по-видимому, возможен и за счет реакций с участием серы и сероводорода, например:



В процессе формирования разнофазовых расслоенных магматических комплексов может происходить как дифференциация расплавов, так и их ликвация с частым обособлением сульфидных жидкостей, насыщенных серой. Уже было указано относительно невысокое содержание в расплавных включениях и во включениях закалочных стекол базальтов оксидов углерода и сероводорода, что объясняется их интенсивным уходом из кристаллизующихся магм.

Помимо летучих компонентов кристаллизующиеся магматические расплавы покидают и микроэлементы в комплексах с Cl, F, частично с P и, возможно, в комплексах с Se, Te, As. Эксперименты показывают эффективную способность щелочно-галогенидных и фторидных фаз, фиксируемых в гетерофазных включениях, экстрагировать малые металлы из силикатных расплавов [18]. Образование тех или иных комплексов носит избирательный характер, зависящий прежде всего

от свойств того или иного элемента и наличия на конкретном уровне соответствующего лиганда. По мере падения термодинамических параметров флюидов происходит смена миграционных форм элементов с образованием комплексов уже с органическими соединениями, синтезирующимися по мере эволюции систем в геологическом разрезе. Именно эти флюиды несут в своем составе геохимическую специализацию магматического очага и определяют геохимический состав нефти, в т.ч. юга Восточной Сибири.

О конкретных механизмах синтеза углеводородов в природных условиях говорить сложно в связи с многообразием реакций и различными сценариями эволюции флюидных систем. Важным является ряд обстоятельств: 1) возможность получения жидких углеводородов различных классов — алкановых, нафтенных, ароматических, составляющих основу нефти; 2) присутствие в продуктах синтеза олефинов и ароматики, что может обеспечить реальную возможность образования во флюиде комплексов с органическими лигандами для широкого круга микроэлементов (Co, Cu, Ni, Ag, V, As, Hg и др.); 3) наличие в продуктах синтеза кислородсодержащих соединений, выступающих лигандами для элементов литофильной группы, связь которых в металлоорганических комплексах осуществляется не непосредственно с углеродом, а через кислород, азот, фосфор.

Сформированные подобным образом высокоэнталпийные восстановленные системы выводятся в верхнюю часть геологического разреза по трещиноватым зонам, сопряженным с разломами в консолидированной коре, формируя углеводородные скопления уже в зависимости от структуры и состава пород осадочного чехла. Вертикальные области развития трещиноватости хорошо фиксируются методом сейсмолокации бокового обзора в рифейских складчатых комплексах Куюмбинского месторождения (см. рис. 3, Б) [21, 25]. Естественно, что состав флюидов и соотношение различных компонентов в них будут изменяться при вариациях P , T , $f\text{O}_2$ условий в процессе восходящей миграции. Параллельно с вовлечением в систему законсервированных флюидов гранитоидных комплексов верхней консолидированной коры, взаимодействия с органическим веществом осадочных пород имеет место и расщепление самих систем с обособлением нерастворимых в новых термодинамических условиях сложных углеродистых веществ.

Принципиальный характер эволюции флюидно-силикатных систем от выделения надкритических газов при остывании магм до формирования гетерофазных и восстановленных нефтеобразующих флюидов представлен на рис. 3, В.

Из приведенных авторами [12, 14, 15, 29] данных следует, что средние составы вещества плюмов (основных и ультраосновных магм) океанов и континентов лежат на линиях смешения между средними составами деплетированной мантии — океанской

коры и DM — континентальной коры, соответственно. Материалы исследований подтверждают участие рециклированной океанской коры и континентальной коры при формировании океанических мантийных плюмов и мантии внутриплитных геодинамических обстановок, т.е. вопросы смещения вещества разных источников как при выплавлении базальтов и сопровождающих их флюидов, так и возникающих скоплений полезных ископаемых вряд ли вызывают сомнения. Последний факт, наряду со спецификой дифференциации восстановленных систем при их миграции в геологическом разрезе, и объясняет, по мнению авторов, некоторый разброс точек состава нефти на различных графиках и дискриминационных диаграммах.

И, наконец, в предлагаемой схеме формирования крупных зон нефтенакопления не рассматривается обсуждаемый многими известными исследователями роль сверхглубинных (внешнее ядро, слой D^{II}, стратифицированные сейсмические границы верхней мантии и др.) флюидов в нефтегазообразовании. Реальность существования таких флюидов не вызывает сомнения: они, в частности, ответственны за образование алмазов, разновременных и разноглубинных зон мантийного метасоматоза. Однако данные измерения летучести кислорода минеральных реакций шпинелевых перидотитовых ксенолитов свидетельствуют о преобладании в литосфере и астеносфере относительно высоких значений величин fO_2 , соответствующих значениям $\log fO_2$ (FMQ) в пределах от 2 до 1 [11]. Вместе с тем, исследования, связанные с влиянием давления на диспропорционирование Fe^2 на Fe^0 и Fe^3 (основного элемента, определяющего редокс-потенциал систем) при твердофазных реакциях, позволяют предполагать более низкие значения fO_2 (IW буферного равновесия), чем наблюдаемые в верхах мантии, на глубинах от 200 до 300 км и ниже. Таким образом, потоки летучих компонентов из недр планеты, носящие изначально восстановленный характер (CH_4 , H_2) в области литосферы с высокими значениями fO_2 будут окисляться с соответствующим увеличением концентрации воды на фронте взаимодействия флюидов с литосферой. Это приводит к понижению температуры солидуса пород и созданию условий для плавления без изменения температуры и давления (редокс-плавление). В последнее время на основе экспериментальных материалов (W.R.Taylor, D.H.Green, 1988; A.A.Kadik, F.Pineau, Y.A.Litvin, 2007; W.R.Taylor, D.H.Green, 1988 et al.) [11 и ссылки в работе] вскрыта важная особенность окислительно-восстановительных реакций в силикатных расплавах, заключающаяся в том, что в областях выплавления магм устойчивыми компонентами расплавов оказываются окисленные формы углерода и водорода (OH , H_2O , CO_3^{2-} , SiC , а при низких значениях fO_2 в магмах, также H_2 , CH_3 , CH_2 , CH_4). Последующие возможные сценарии развития процессов де-

флюидизации магм и их геохимические следствия были рассмотрены в настоящей статье.

Приведенные в статье материалы позволяют сделать следующие выводы:

1. Результаты геохимических исследований свидетельствуют об участии в процессах нефтеобразования и нефтенакопления эндогенных флюидов, отражающих геохимическую среду земной коры, формировавшейся в различных геодинамических обстановках при активном участии основных магм.

2. Геофизические исследования, выполненные в пределах Камовского свода Байкитской антеклизы Сибирской платформы, показали наличие под крупнейшей Юрубчено-Тохомской зоной нефтегазоаккумуляции аномального строения консолидированной земной коры, обусловленного многостадийностью ее формирования при участии базит-гипербазитовых интрузий.

3. На основе комплексного анализа геохимических, геофизических и геологических материалов предложена принципиальная модель формирования восстановленных нефтеобразующих флюидов, участвующих в процессах нефтенакопления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булин Н.К., Егоркин Н.К. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. —М.: Центр ГЕОН, 2000.
2. Винокуров С.Ф., Готтих Р.П., Писоцкий Б.И. Особенности распределения лантаноидов в смолисто-асфальтовых фракциях один из геохимических критериев источников микроэлементов в нефти // Геохимия. 2010. № 4. С. 377—389.
3. Готтих Р.П., Писоцкий Б.И. Битумогенез и некоторые аспекты эволюции флюидов / Генезис углеводородных флюидов и месторождений. —М.: ГЕОС, 2006. С. 23—37.
4. Готтих Р.П., Писоцкий Б.И., Журавлев Д.З. Геохимические особенности нефти различных регионов и возможный источник металлов в ней // Докл. РАН. 2008. Т. 422. № 1. С. 88—92.
5. Готтих Р.П., Писоцкий Б.И. Восстановленные флюиды в геологических разрезах нефтегазоносных площадей. Возможные источники и условия формирования // Материалы XIII Международной конференции по термобарогеохимии и IV симпозиума APIFIS. —М., 2008. Т. 2. С. 241—244.
6. Готтих Р.П., Писоцкий Б.И. Элементы-примеси как индикаторы геодинамических обстановок нефтенакопления // Докл. РАН. 2010. Т. 433. № 4. С. 507—511.
7. Готтих Р.П., Писоцкий Б.И., Галуев В.И., Каплан С.А. Строение консолидированной земной коры Камовского свода Сибирской платформы и возможные факторы формирования геофизических аномалий // Литосфера. 2010. № 1. С. 47—63.
8. Граменицкий Е.Н., Котельников А.Р., Батанова А.М. и др. Экспериментальная и техническая петрология. —М.: Научный Мир, 2000.
9. Доровский В.Н. Характерные времена экстракции примесных частиц из магматического расплава в присутствии поверхностно-активных веществ // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 5. С. 626—638.

10. Золотухин В.В., Васильев Ю.Р. О переменном содержании калия в субщелочных ультрабазитовых лавах севера Сибирской платформы и проблема их генезиса // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 11. С. 1145—1161.
11. Кадик А.А. Режим летучести кислорода в верхней мантии как отражение химической дифференциации планетарного вещества // Геохимия. 2006. № 1. С. 63—79.
12. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А. Летучие компоненты (H₂O, CO₂, Cl, F, S) в базитовых магмах различных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол // Петрология. 2000. Т. 8. № 2. С. 131—164.
13. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В. и др. Канонические отношения элементов-примесей в базитовых магмах различных геодинамических обстановок (оценка по составам расплавных включений и стекол пород) // Докл. РАН. 2009. Т. 426. № 2. С. 222—225.
14. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В. и др. Средние составы магм и мантии срединно-океанических хребтов и внутриплитных океанических и континентальных обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол базальтов // Петрология. 2007. Т. 15. № 4. С. 361—396.
15. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В. и др. Средний состав базитовых магм и мантийных источников островных дуг и активных континентальных окраин по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол пород // Петрология. 2010. Т. 18. № 1. С. 3—28.
16. Липидус А.Л., Крылова А.Ю. О механизме образования жидких углеводородов из СО и Н₂ на кобальтовых катализаторах // Химическая промышленность. 2004. № 5. С. 43—56.
17. Лурье М.А., Шмидт Ф.А. О возможности абиогенного образования нефтегазовых систем // Отечественная геология. 2008. № 1. С. 10—18.
18. Маракушев А.А., Сук Н.И., Новиков М.П. Хлоридная экстракция рудогенных металлов и проблема их миграции из магматических очагов // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 1. С. 83—86.
19. Маракушев А.А., Писоцкий Б.И., Панях Н.А., Готтих Р.П. Геохимическая специфика нефти и происхождение ее месторождений // Докл. РАН. 2004. Т. 398. № 6. С. 795—799.
20. Миронова О.Ф. Летучие компоненты природных флюидов по данным изучения включений в минералах: методы и результаты // Геохимия. 2010. № 1. С. 89—97.
21. Мухаметзянов Р.Н., Соколов Е.П., Шленкин С.И. и др. Строение рифейских природных резервуаров Куломбинского и Терско-Камовского участков Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции // Геология нефти и газа. 2003. № 4. С. 39—45.
22. Наумов В.Б., Коваленко В.А., Мызников И.К. и др. Высокобарические флюиды гидротермальных жил Рябининского щелочного массива (Центральный Алдан) // Докл. РАН. 1995. Т. 343. № 1. С. 99—102.
23. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Ярмолюк В.В. Средние содержания петрогенных, летучих и редких элементов в магматических расплавах различных геодинамических обстановок // Геохимия. 2004. № 10. С. 1113—1124.
24. Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф. Основные физико-химические параметры природных минералообразующих флюидов // Геохимия. 2009. № 8. С. 825—851.
25. Харахинов В.В., Шленкин С.И. Нефтегазоносность докембрийских толщ Восточной Сибири на примере Куломбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазоаккумуляции. —М.: Научный мир, 2011.
26. Шаранов В.Н., Акимцев В.Н., Аценков И.В. и др. К физико-химической динамике отложения компонентов из магматогенной газовой фазы над мантийными магматическими очагами базитового расплава // Геохимия. 2004. № 12. С. 1271—1284.
27. Шарков Е.В. Формирование расслоенных интрузивов и связанного с ними оруденения. —М.: Научный мир, 2006.
28. Шейн В.С. Геология и нефтегазоносность России. —М.: Известия, 2006.
29. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Наумов В.Б. Геодинамика, потоки и рециклинг летучих компонентов между мантией и верхними оболочками Земли // Геотектоника. 2005. № 1. С. 45—63.
30. Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses // Earth Planet. Sci. Lett. 1973. Vol. 19. Pp. 290—300.