

УДК 550.8

DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art23

ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ МЕТАЛЛОВ – ПОПУТНЫХ КОМПОНЕНТОВ МАТРИЧНОЙ НЕФТИ ОРЕНБУРГСКОГО НГКМ

Скибицкая Н.А.¹, Бурханова И.О.¹, Большаков М.Н.¹, Доманова Е.Г.¹, Зекель Л.А.²

1 – Институт проблем нефти и газа РАН,

2 – Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН

E-mail: skibitchka@mail.ru

Аннотация. Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение (ОНГКМ) введено в эксплуатацию в 1971 году, и сегодня здесь наблюдается падение добычи и истощение запасов основного углеводородного сырья – газа и конденсата. По этим причинам задача обеспечения Оренбургского нефтегазохимического комплекса сырьем Оренбургского месторождения является весьма актуальной. Одним из способов укрепления сырьевой базы ОНГКМ является ее расширение за счет окончательной оценки и постановки на баланс запасов трудноизвлекаемой матричной нефти, в том числе в результате оценки прогнозных ресурсов содержащихся в ней ценных металлов – редких, редкоземельных, цветных и благородных.

Ключевые слова: высокомолекулярные компоненты, матричная нефть, асфальтены, смолы, Оренбургское НГКМ, прогнозные ресурсы, редкие, редкоземельные, благородные, цветные металлы.

MATRIX OIL ASSOCIATED COMPONENTS POSSIBLE RESOURCES (OBJECT OF STUDY – CENTRAL SECTION OF ORENBURG OIL-GAS- CONDENSATE FIELD)

Skibitskaya N.A.¹, Burkhanova I.O.¹, Bolshakov M.N.¹, Domanova E.G.¹, Zekel L.A.²

1 – Oil and Gas Research Institute RAS,

2 – Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis RAS

E-mail: skibitchka@mail.ru

Abstract. Orenburg Oil-Gas-Condensate Field exploitation started at 1971. At the present time production decline and depletion of main hydrocarbon reserves – gas and condensate are observed here. Therefore Orenburg oil and gas refining and petrochemical complex raw materials base expansion are necessary. One way to expand material base is by final estimation and entering of the unconventional matrix oil reserves on the balance sheet including estimating of associated rare, rare-earth, nonferrous and precious metals resources.

Keywords: High-molecular-weight components, matrix oil, asphaltenes, tars, Orenburg Oil-Gas-Condensate Field, possible resources, rare and rare-earth, nonferrous and precious metals.

Матричная нефть карбонатных нефтегазоматеринских отложений на начальных этапах своего преобразования до жидких нефтяных углеводородов (УВ) обогащена наиболее тяжелыми и наименее преобразованными высокомолекулярными компонентами (ВМК) – асфальтенами и тяжелыми смолами. Именно эти компоненты содержат в своем составе высокие концентрации микроэлементов, в том числе редких, редкоземельных, цветных и благородных металлов.

Преобразование в геологическом времени тяжелых компонентов матричной нефти – асфальтенов и тяжелых смол – до более легких смол, масел и жидких нефтяных углеводородов сопровождается выходом металлов в виде самородных металлов и рудных минералов. Таким образом, в процессе созревания матричной нефти в ней существенно снижается концентрация высокоценных микроэлементов.

Именно поэтому необходимо применение технологий направленной добычи не только жидких углеводородов матричной нефти, но и ее наиболее тяжелых и ценных незрелых металлоносных высокомолекулярных компонентов – фактически, технологий не только попутной, но и направленной добычи высокоценных металлов, остро необходимых для развития инновационных технологий нового поколения.

Изучаемые ВМК матричной нефти являются наиболее трудноизвлекаемыми при ее направленной добыче. Вовлечение в разработку объектов с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов требует больших затрат, поэтому важно обеспечить рентабельность таких проектов. Предварительный технико-экономический анализ комплексного проекта от добычи до глубокой переработки с извлечением на ее заключительных стадиях ценных металлов и их товарных продуктов показывает высокую рентабельность проекта в целом. Причем устойчивость проекта обеспечивается именно быстро окупаемым металлургическим блоком. Для проведения технико-экономического анализа на первоначальном этапе необходимо оценить ресурсы ценных попутных компонентов – металлов.

Предпосылкой к изучению металлоносности матричной нефти стало проведенное в предыдущие годы исследование микроэлементного состава образцов асфальто-смоло-

парафиновых отложений (АСПО), отобранных из аппаратов установок комплексной подготовки газа (УКПГ) ОНГКМ [1]. Оценка концентраций микроэлементов проводилась способом эмиссионного спектрального анализа с индуктивно связанной плазмой в специализированных лабораториях институтов «Гиредмет», ВИМС и ГИГХС. Как показали исследования, АСПО ОНГКМ в ряде зон характеризуются высокими концентрациями ванадия, никеля, галлия, титана, серебра, хрома, цинка, меди, стронция. Высокие (промышленные) концентрации ценных металлов установлены в образцах АСПО, отобранных с забоев, стволов скважин, из насосно-компрессорных труб.

В образцах АСПО Оренбургского месторождения из наземного сепарационного оборудования максимальные концентрации некоторых микроэлементов достигают следующих значений: никель Ni – 1000 мкг/г (УКПГ-6), ванадий V – более 10000 мкг/г (УКПГ-7, 9), молибден Mo – 10 мкг/г (УКПГ-1, 2), медь Cu – 4000 мкг/г (УКПГ-2), свинец Pb – 1000 мкг/г (УКПГ-1), серебро Ag – 3 мкг/г (УКПГ-7), мышьяк As – 300 мкг/г (УКПГ-6), цинк Zn – 6000 мкг/г (УКПГ-1), олово Sn – 40 мкг/г (УКПГ-2), германий Ge – 3 мкг/г (УКПГ-2, 7, 12), галлий Ga – 200 мкг/г (УКПГ-6), иттербий Yb – 0,8 мкг/г (УКПГ-3, 9), стронций Sr – 800 мкг/г (УКПГ-1).

Высокомолекулярные компоненты матричной нефти являются продуктом преобразования керогеноподобного полимера, который представляет собой нерастворимое в органических растворителях поликонденсированное органическое вещество. Исследование микроэлементного состава керогеноподобного полимера, выделенного из образцов пород Оренбургского НГКМ, также выявило высокие концентрации в нем металлов. Например, ванадий содержится в керогене в количестве 1020 мкг/г, никель – 633,2 мкг/г, галлий – 45 мкг/г [2]. Таким образом, кероген характеризуется даже более высокими концентрациями металлов, чем асфальтены ([3], отчет о НИР*). Однако, применяемые способы добычи углеводородов из продуктивных отложений месторождений УВ не позволяют извлечь керогеноподобный полимер вместе с металлами. По этой причине оценивать ресурсы металлов, содержащихся в нерастворимом керогеноподобном органическом веществе ОНГКМ, нецелесообразно.

* «Увеличение ресурсного потенциала газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений в результате оценки суммарных и покомпонентных (жидких углеводородов, масел, смол, асфальтенов) ресурсов матричной нефти»: Отчет о НИР по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук за 2016 г. / Руководитель темы Скибицкая Н.А. М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2016. 22 с.

В настоящей работе использованы результаты оценки концентраций микроэлементов в отдельных компонентах битумоидов – асфальтенах, смолах бензольных и спирто-бензольных, маслах, парафинах ([3], отчет о НИР*).

Оценка прогнозных ресурсов металлов проводилась объемно-весовым методом в следующих подсчетных объектах:

- артинские отложения центральной части ОНГКМ;
- сакмарские отложения центральной части ОНГКМ;
- ассельские отложения центральной части ОНГКМ;
- верхнекаменноугольные отложения центральной части ОНГКМ;
- среднекаменноугольные отложения центральной части ОНГКМ.

Распределение металлов напрямую зависит от содержания ВМК матричной нефти в горных породах. Оценка ресурсов микроэлементов проводилась на основе ранее разработанной модели распределения высокомолекулярных компонентов матричной нефти. На рис. 1, 2 приведены результаты подсчета запасов ВМК матричной нефти, в том числе масел, смол (спирто-бензольных и бензольных), асфальтенов. Суммарные геологические запасы матричной нефти (уточненные по разработанной методике в ИПНГ РАН) в центральной части ОНГКМ составили 2054,0 млн т, из них 411,9 млн т приходится на ВМК. Высокомолекулярные компоненты матричной нефти ОНГКМ почти на три четверти состоят из углеводородных компонентов – масел (53%) и легких бензольных смол (20%). Наиболее тяжелые неуглеводородные компоненты битумоидов, которые концентрируют в себе основную часть металлов, содержатся в ВМК в меньшем количестве: доля асфальтенов составляет 17%, спирто-бензольных смол – 11% (отчет о НИР**). Количество твердых парафинов в изучаемых битумоидах мало (не превышает 12,9% при среднем значении 6,1% [4]), по этой причине при подсчете запасов данный компонент был объединен с маслами. Таким образом, перед оценкой прогнозных ресурсов

* «Увеличение ресурсного потенциала газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений в результате оценки суммарных и покомпонентных (жидких углеводородов, масел, смол, асфальтенов) ресурсов матричной нефти»: Отчет о НИР по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук за 2016 г. / Руководитель темы Скибицкая Н.А. М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2016. 22 с.

** «Увеличение ресурсного потенциала газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений в результате оценки суммарных и покомпонентных (жидких углеводородов, масел, смол, асфальтенов) ресурсов матричной нефти»: Отчет о НИР по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук за 2013–2015 гг. / Руководитель темы Скибицкая Н.А. М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2015. 78 с.

металлов необходимо подсчитать геологические запасы отдельных высокомолекулярных компонентов матричной нефти.

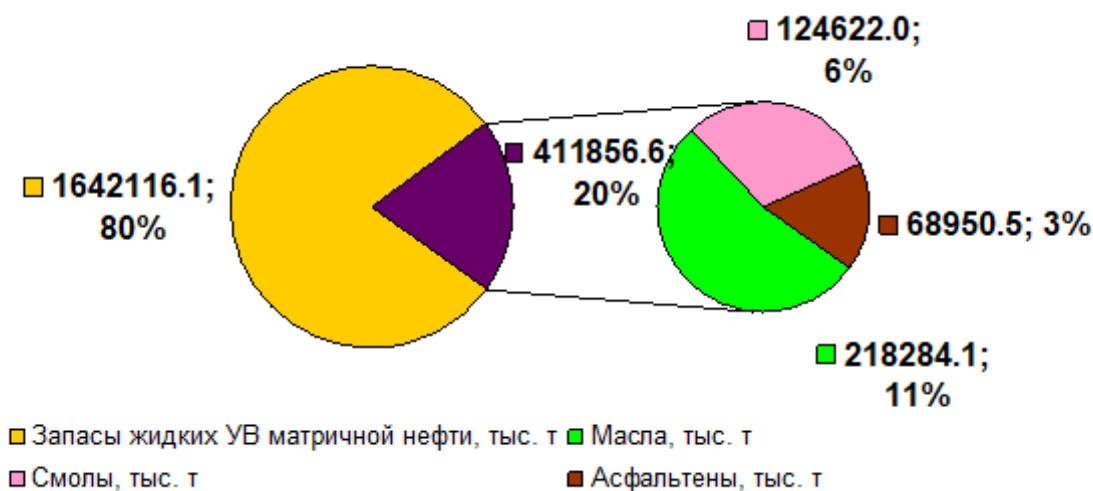


Рис. 1. – Структура геологических запасов матричной нефти, тыс. т (отчет о НИР*)

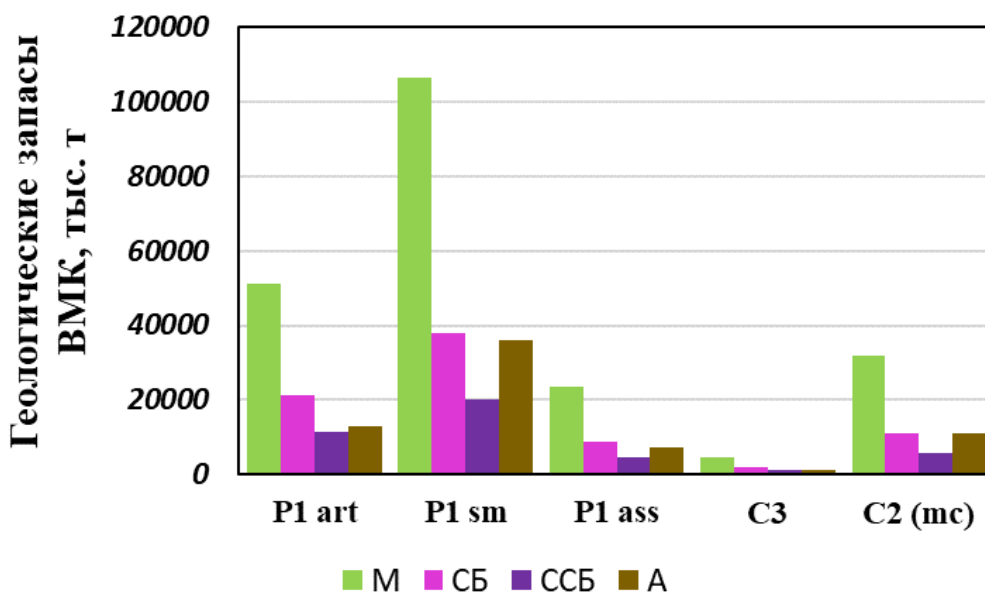


Рис. 2. – Распределение геологических запасов ВМК матричной нефти по стратиграфическим подразделениям (отчет о НИР*)

* «Увеличение ресурсного потенциала газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений в результате оценки суммарных и покомпонентных (жидких углеводородов, масел, смол, асфальтенов) ресурсов матричной нефти»: Отчет о НИР по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук за 2013–2015 гг. / Руководитель темы Скибицкая Н.А. М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2015. 78 с.

Методика оценки концентраций металлов в продуктивных отложениях центральной части Оренбургского НГКМ

Высокомолекулярные компоненты матричной нефти обогащены различными ценными микроэлементами. В результате лабораторных исследований в асфальтенах, смолах спирто-бензольных и бензольных, маслах, твердых парафинах было оценено содержание более 40 элементов периодической системы Д.И. Менделеева ([3], отчет о НИР*). Для оценки прогнозных ресурсов были выбраны следующие микроэлементы: ванадий V, галлий Ga, германий Ge, иттрий Y, медь Cu, молибден Mo, никель Ni, свинец Pb, серебро Ag, стронций Sr, титан Ti, хром Cr. Перечисленные металлы наиболее сконцентрированы в битумоидах ОНГКМ и при этом ценны для промышленности.

Выбранные 12 микроэлементов были разделены на две группы – цветные и благородные металлы (медь, никель, свинец, серебро, титан, хром) и редкие и редкоземельные металлы (ванадий, галлий, германий, иттрий, молибден, стронций). Содержание металлов в отдельных компонентах ВМК центральной части ОНГКМ отражено в табл. 1 ([3], отчет о НИР*).

Таблица 1

Средние содержания микроэлементов в битумоидах центральной части Оренбургского НГКМ (ПО – предел обнаружения, А – асфальтены, ССБ – смолы спирто-бензольные, СБ – смолы бензольные, М – масла, П – парафины) ([3], отчет о НИР*)

№ п/п	Микро-элемент	Сим-вол	ПО, мкг/г	Содержание микроэлементов в битумоидах, мкг/г				
				А	ССБ	СБ	М	П
1	Ванадий	V	0,563	908,3	344,4	70,5	0,3	15,9
2	Галлий	Ga	0,04	4,26	0,40	4,36	0,06	0,03
3	Германий	Ge	0,09	0,222	-	-	0,062	-
4	Иттрий	Y	0,001	0,029	0,013	0,008	0,009	0,006
5	Медь	Cu	0,231	36,31	2,39	1,31	0,23	0,12
6	Молибден	Mo	0,042	38,48	0,35	0,23	0,11	0,05
7	Никель	Ni	0,081	247,2	33,0	18,8	0,5	9,7
8	Свинец	Pb	0,088	2,56	0,41	0,30	0,07	0,16
9	Серебро	Ag	0,014	4,68	0,39	0,15	0,06	0,03
10	Стронций	Sr	0,125	5,34	0,37	0,37	0,16	0,12
11	Титан	Ti	0,345	11,6	7,7	6,8	2,3	2,0
12	Хром	Cr	0,236	10,61	2,85	2,11	1,04	0,12

* «Увеличение ресурсного потенциала газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений в результате оценки суммарных и покомпонентных (жидких углеводородов, масел, смол, асфальтенов) ресурсов матричной нефти»: Отчет о НИР по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук за 2016 г. / Руководитель темы Скибицкая Н.А. М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2016. 22 с.

Оценка массового содержания металлов в объеме газонасыщенных пород центральной части Оренбургского месторождения проводилась формуле (1):

$$C_{Me} = C_{Me}^A \cdot C_A + C_{Me}^{CCB} \cdot C_{CCB} + C_{Me}^{CB} \cdot C_{CB} + C_{Me}^M \cdot C_M, \quad (1)$$

где C_{Me} – массовая концентрация металла ($\text{мг}/\text{м}^3$ горной породы), C_{Me}^A (C_{Me}^{CCB} , C_{Me}^{CB} , C_{Me}^M) – массовая концентрация металла в асфальтенах (смолах спирто-бензольных, смолах бензольных, маслах) ($\text{мкг}/\text{г}$ или $\text{мг}/\text{кг}$ или $\text{г}/\text{т}$), C_M (C_{CCB} , C_{CB} , C_M) – массовая концентрация асфальтенов (смол спирто-бензольных, смол бензольных, масел, $\text{кг}/\text{м}^3$ горной породы).

На основе разработанной методики оценки концентраций металлов и разработанных ранее объемных (3D) геолого-геохимических моделей распределения асфальтенов, смол спирто-бензольных, смол бензольных и масел была создана объемная (3D) модель центральной части Оренбургского НГКМ, описывающая распределение микроэлементов в объеме продуктивных отложений выше ВНК.

Оценка прогнозных ресурсов проводилась дифференцированно: по стратиграфическим подразделениям (нижнепермские отложения – артинский, сакмарский, ассельский ярусы, верхнекаменноугольные отложения, среднекаменноугольные отложения – мячковский горизонт московского яруса); по типам коллектора (трещинно-поровый, поровый).

Расчет суммарного массового содержания микроэлементов Q_{Me} в продуктивных отложениях Оренбургского месторождения проводился по формуле (2):

$$Q_{Me} = V \cdot C_{Me} \cdot 10^{-9}, \quad (2)$$

где Q_{Me} – прогнозные ресурсы микроэлемента (т); V – геометрический объем породы до поверхности водонефтяного или газонефтяного контакта (м^3); C_{Me} – массовая концентрация микроэлемента ($\text{мг}/\text{м}^3$ горной породы).

Результаты оценки прогнозных ресурсов металлов в продуктивных отложениях центральной части Оренбургского НГКМ

Результаты оценки прогнозных ресурсов металлов в продуктивных отложениях центральной части Оренбургского НГКМ отражены на рис. 3. Суммарные ресурсы ванадия V составили 86905,4 т, галлия Ga – 666,1 т, германия Ge – 44,2 т, иттрия Y – 5,3 т, меди Cu – 2829,2 т, молибдена Mo – 2769,2 т, никеля Ni – 20628,0 т, свинца Pb – 239,6 т, серебра Ag – 374,1 т, стронция Sr – 458,6 т, титана Ti – 2238,9 т, хрома Cr – 1284,4 т.

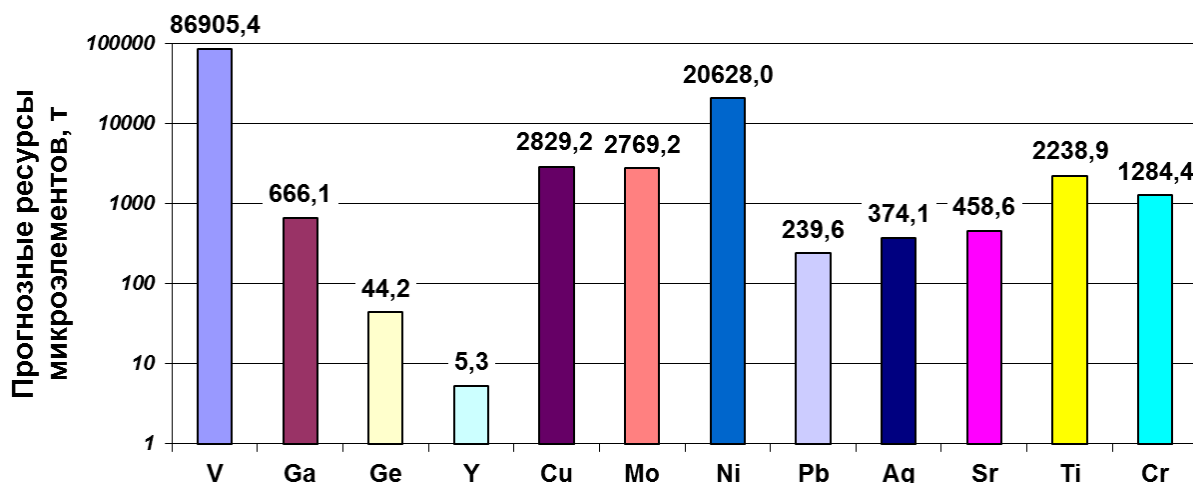


Рис. 3. Прогнозные ресурсы микроэлементов в продуктивных отложениях центральной части Оренбургского НГКМ

Большая часть прогнозных ресурсов микроэлементов сконцентрирована в низкопористых породах (трещинно-поровые коллекторы) – 58,4%. Нижнепермские отложения вмещают основную долю прогнозных ресурсов ценных микроэлементов (82%): породы артинского яруса – 24219,7 т (20%), отложения сакмарского яруса – 60210,5 т (51%), ассельского – 12674,1 т (11%). Породы верхнего карбона содержат 2257,8 т металлов (2%), мячковского горизонта московского яруса среднего карбона – 19081,1 т (16%) (рис. 4).

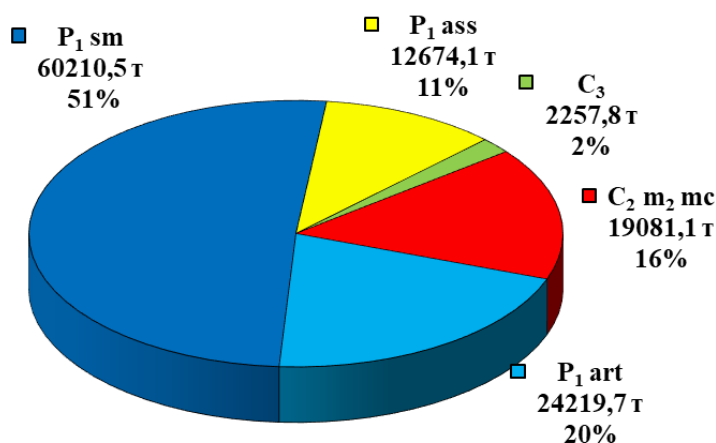


Рис. 4. Распределение суммарных прогнозных ресурсов микроэлементов в продуктивных отложениях центральной части Оренбургского НГКМ по стратиграфическим подразделениям

Соотношение прогнозных ресурсов цветных и благородных металлов (медь, никель, свинец, серебро, титан, хром) и редких и редкоземельных металлов (ванадий,

галлий, германий, иттрий, молибден, стронций) составляет 3:10 (23 и 77% соответственно) (рис. 5). В первой группе по величине ресурсов лидирует никель (20628,0 т), во второй группе – ванадий (86905,4 т).

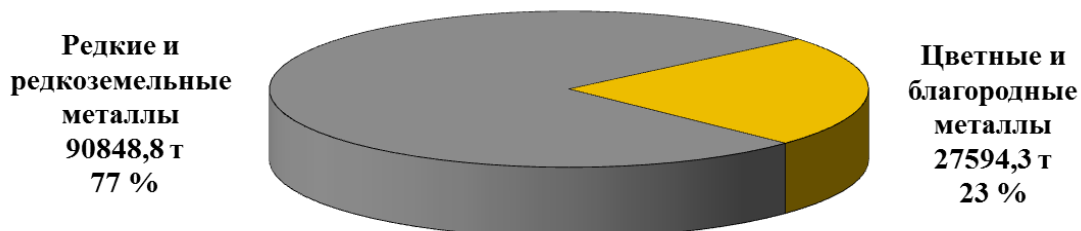


Рис. 5 – Соотношение суммарных прогнозных ресурсов цветных и благородных и редких и редкоземельных металлов, содержащихся в высокомолекулярных компонентах матричной нефти (маслах, смолах тяжелых и легких, асфальтенах), в продуктивных отложениях центральной части Оренбургского НГКМ

Линейные прогнозные ресурсы (ЛПР) микроэлементов в среднем по месторождению показаны в табл. 2 и на рис. 6. Линейные прогнозные ресурсы были оценены для каждого объекта в отдельности, а также рассчитаны средние ЛПР по месторождению путем деления суммарных прогнозных ресурсов металлов на среднюю площадь пяти подсчетных объектов. Величина средних ЛПР ванадия V составила 140,8 г/м², галлия Ga – 1,08 г/м², германия Ge – 0,072 г/м², иттрия Y – 0,0086 г/м², меди Cu – 4,58 г/м², молибдена Mo – 4,49 г/м², никеля Ni – 33,4 г/м², свинца Pb – 0,388 г/м², серебра Ag – 0,16 г/м², стронция Sr – 0,74 г/м², титана Ti – 3,63 г/м², хрома Cr – 2,08 г/м².

Таблица 2

Средние линейные прогнозные ресурсы микроэлементов, содержащихся в высокомолекулярных компонентах матричной нефти (маслах, смолах тяжелых и легких, асфальтенах), в продуктивных отложениях центральной части Оренбургского НГКМ, г/м²

Возраст	V	Ga	Ge	Y	Cu	Mo
P ₁ art	21,2	0,18	0,012	0,0014	0,65	0,62
P ₁ sm	59,8	0,45	0,030	0,0036	1,98	1,96
P ₁ ass	15,2	0,12	0,008	0,0009	0,50	0,48
C ₃	3,4	0,03	0,002	0,0002	0,10	0,10
C ₂ m ₂ mc	34,7	0,25	0,017	0,0020	1,16	1,15
Всего	140,8	1,08	0,072	0,0086	4,58	4,49

Продолжение табл. 2

Возраст	Ni	Pb	Ag	Sr	Ti	Cr
P ₁ art	4,8	0,058	0,09	0,11	0,60	0,32
P ₁ sm	14,4	0,166	0,26	0,32	1,50	0,88
P ₁ ass	3,6	0,042	0,07	0,08	0,39	0,23
C ₃	0,8	0,009	0,01	0,02	0,10	0,05
C ₂ m ₂ mc	8,4	0,096	0,15	0,19	0,85	0,50
Всего	33,4	0,388	0,61	0,74	3,63	2,08

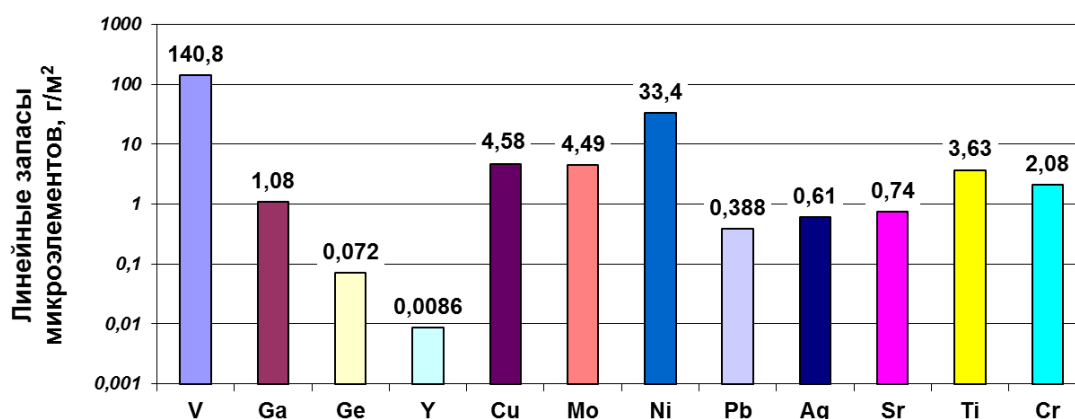


Рис. 6. Средние линейные прогнозные ресурсы микроэлементов в продуктивных отложениях центральной части Оренбургского НКМ

Заключение

На основе модели распределения высокомолекулярных компонентов, разработанной для продуктивных отложений центральной части Оренбургского месторождения, а также результатов лабораторного определения концентраций микроэлементов в битумоидах была впервые проведена оценка прогнозных ресурсов металлов – ценных попутных компонентов матричной нефти. В результате было показано, что наиболее незрелая тяжелая часть нефти ранних стадий нефтегенерации, при условии ее добычи и глубокой переработки, является также ценным сырьем для получения редких и редкоземельных, цветных и благородных металлов.

Изучаемые высокомолекулярные компоненты матричной нефти являются наиболее трудноизвлекаемыми при ее направленной добыче. Однако именно блок извлечения металлов из остатков глубокой переработки тяжелой битуминозной нефти является максимально быстро окупаемым и обеспечивающим финансовую устойчивость не только процесса нефтепереработки, но и всего технологического процесса: от добычи такой нефти вместе с газом и конденсатом до ее глубокой комплексной переработки.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Системный подход к совершенствованию теории и практики нефтегазогеологического районирования, прогнозирования нефтегазоносности и формирования ресурсной базы нефтегазового комплекса России», № АААА-А17-117082360031-8).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галян Е.Н.* Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение как источник полиметаллического сырья: Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: Всероссийский НИИ природных газов и газовых технологий, 1996. 141 с.

2. *Дмитриевский А.Н., Скибицкая Н.А., Зекель Л.А., Навроцкий О.К., Доманова Е.Г., Краснобаева Н.В., Пуго Т.А.* Состав нерастворимого керогеноподобного органического полимера в карбонатных породах Оренбургского газоконденсатного месторождения // *Химия твердого топлива*. 2011. № 3. С. 61–70.

3. *Скибицкая Н.А., Навроцкий О.К., Бурханова И.О., Большаков М.Н., Зекель Л.А.* Содержание металлов в высокомолекулярных компонентах нефти ранней стадии нефтегенерации (на примере Оренбургского НГКМ) // *Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина*. 2016. № 2(283). С. 23–34.

4. *Дмитриевский А.Н., Скибицкая Н.А., Зекель Л.А., Навроцкий О.К., Краснобаева Н.В., Доманова Е.Г.* Состав и свойства природных высокомолекулярных компонентов газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений // *Химия твердого топлива*. 2010. № 3. С. 67–77.