

Геоинформатика. 2025. № 2. С. 53–61.
Geoinformatika. 2025;(2):53–61.

Информационные системы в геологии и геофизике

Научная статья
 УДК 553.982
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-2-53-61>

Геоинформационный анализ металлоносной нефти баженовской свиты

© 2025 г. — Ирина Германовна Яценко

ФГБУН Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук; Томск, Россия
 sric@ipc.tsc.ru

Аннотация: В статье представлены результаты геоинформационного анализа особенностей размещения обогащенной металлами нефти баженовской свиты Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Нефть баженовской свиты является трудноизвлекаемой, перспективной технологией ее добычи признана опасная для окружающей среды технология гидроразрыва пласта, при этом повышенное содержание в нефти тяжелых металлов усугубляет экологические риски. При разработке такой нефти существует опасность попадания тяжелых металлов (например, ванадия и никеля) в природную среду в процессе ее добычи, транспортировки и переработки. Для проведения анализа металлоносной баженовской нефти использован массив данных объемом 68 образцов нефти из 33 месторождений Западно-Сибирского бассейна. С использованием информации из базы данных Института химии нефти СО РАН и методов статистического и пространственного анализа установлены закономерности условий залегания металлоносной нефти и ее физико-химические свойства. Определены пластовые параметры, характеризующие фильтрационно-емкостные свойства залежей месторождений. Выявлены месторождения баженовской свиты с высоким и средним содержанием ванадия и никеля. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих методов и технологий добычи и переработки металлоносных нефтей с учетом экологических последствий.

Ключевые слова: *металлоносная нефть; баженовская свита; ванадий; никель; месторождения; Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн.*

Для цитирования: Яценко И.Г. Геоинформационный анализ металлоносной нефти баженовской свиты // *Геоинформатика*. — 2025. — № 2. — С. 53–61. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-2-53-61>.

Information systems in geology and geophysics

Original article

Geoinformation analysis of metalliferous oil of the Bazhenov formation

© 2025 — Irina G. Yashchenko

Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Tomsk, Russia
 sric@ipc.tsc.ru

Abstract: The results of a geoinformation analysis of the geographical features of the placement of metal-enriched oil from the Bazhenov formation of the West Siberian oil and gas basin are presented. The oil of the Bazhenov formation is difficult to recover, hydraulic fracturing technology is recognized as promising for its development, but dangerous to the environment, and the increased content of heavy metals in the oil exacerbates environmental risks. When developing such oil, there is a danger of heavy metals (for example, vanadium and nickel) entering the natural environment during its extraction, transportation and processing. An array of 68 oil samples from 33 fields in the West Siberian basin was used to analyze metalliferous Bazhenov oil. Using information from the database of the Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and methods of statistical and spatial analysis, the patterns of the conditions of occurrence of metalliferous oil and its physico-chemical properties have been established. The reservoir parameters characterizing the filtration and capacitance properties of the deposits are determined. Deposits of the Bazhenov formation with high and medium concentrations of vanadium and nickel have been identified. The results of the study can be used in the development of new and improvement of existing methods and technologies for the extraction and processing of metalliferous oils, taking into account the environmental consequences.

Key words: *metalliferous oil; Bazhenov formation; vanadium; nickel; deposits; West Siberian oil and gas basin.*

For citation: Yashchenko I.G. Geoinformation analysis of metalliferous oil of the Bazhenov formation. *Geoinformatika*. 2025;(2):53–61. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-2-53-61>. In Russ.

Введение

Содержание металлов в нефти значительно влияет на процессы добычи, транспортировки, нефтепереработки и дальнейшего использования нефтепродуктов. В нефти высокую концентрацию имеют ванадий (V) и никель (Ni), их содержание в нефтепродуктах может быть сопоставимо с содержанием в руде. Мировые потенциальные ресурсы ванадия в нефти и битумах составляют около 125 млн т, а извлекаемые попутно с нефтью – примерно 20 млн т [1, 2].

Благодаря уникальным свойствам спрос на ванадий возрастает на 7 % в год – этот металл является самой эффективной по сравнению с другими металлами легирующей добавкой к стали, так как небольшое его количество может радикально увеличить прочность на разрыв. Из такой стали изготавливают усиленную арматуру строительных сооружений, плотин, туннелей, мостов и других инженерных объектов для уменьшения катастрофических разрушений в сейсмически-активных регионах. Ванадий-титановые сплавы имеют высокое соотношение прочности и массы, поэтому их широко используют в аэрокосмической технике. Спрос на ванадий будет расти и далее, потому что он используется в литий-ванадиевых батареях для электромобилей, причем здесь ванадию нефтяного происхождения отдается предпочтение из-за его более высокой чистоты по сравнению с рудным. Извлечением ванадия и никеля можно частично компенсировать большие издержки при добыче и транспортировке тяжелой трудноизвлекаемой нефти [1, 3–6].

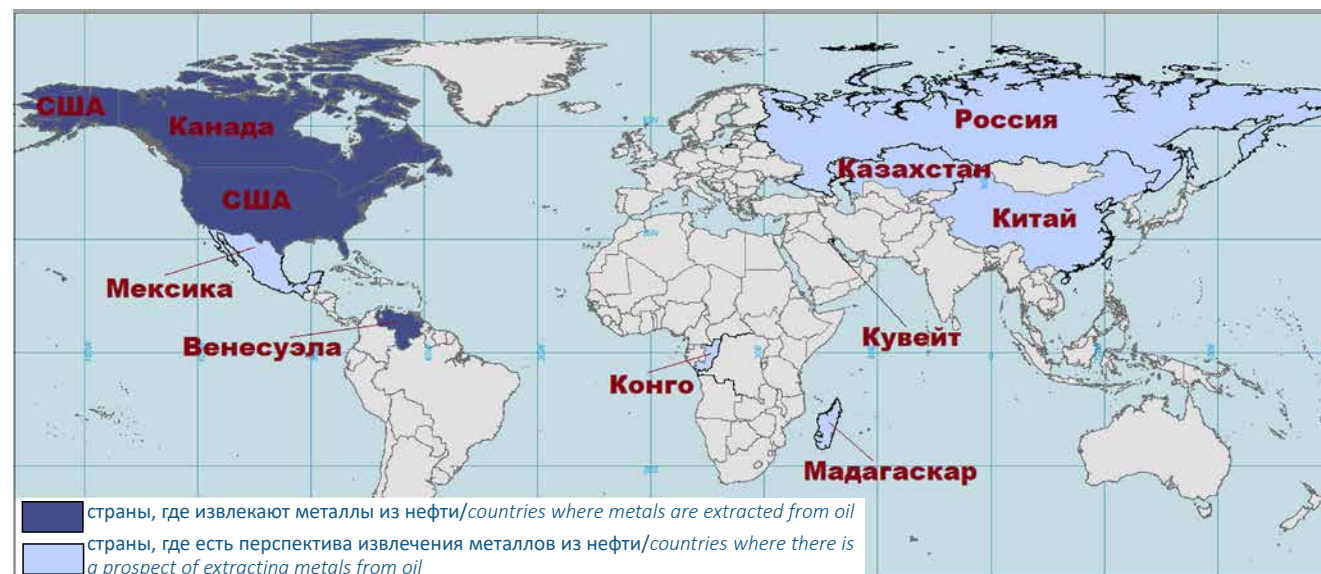
Металлы ванадий и никель являются каталитическими ядами, негативно влияющими на активность и срок службы катализаторов нефтепе-

реработки, а также селективность производства. Кроме того, коррозионная активность ванадия существенно ускоряет износ лопаток турбин авиационных двигателей, абразивный износ поршневой пары, а также коррозию стенок котлов. Ванадий, образуя летучие токсичные соединения, попадает в атмосферу, нанося вред окружающей природе и человеку.

На данный момент продукция, получаемая из соединений ванадия и никеля, все больше начинает применяться в металлургической, химической, аэрокосмической, энергетической и других отраслях промышленности, за счет чего в ближайшее время возможен дефицит такого сырья в России. В России нет технологий, которые были бы нацелены на выделение соединений металлов из нефти, есть отдельные примеры, где технологии с помощью побочных процессов могут деметаллизировать УВ-сырье. За рубежом технологии извлечения металлов из тяжелой нефти разработаны и широко применяются в нефтедобыче и переработке. В Венесуэле, Канаде и США уже добывают ванадий, никель и уран из нефти, битумов и отходов нефтепереработки [2–4]. В каждой тонне тяжелой нефти, например, месторождения Атабаски (Канада) содержится 250 г ванадия и 100 г никеля, в нефти месторождения Бокан (Венесуэла) – 1200 и 150 г соответственно. В Канаде и США нефтяной ванадий составляет более 15 % его общего производства. Ванадий, добываемый из золы нефти сверхгигантских месторождений Венесуэлы и экспортируемый в США, удовлетворяет более 50 % спроса на этот металл [5]. Перспективы извлечения металлов из нефти есть у России (рис. 1). В основном такие запасы находятся в Волго-Уральском, Тимано-Печорском нефтегазоносных бассейнах (НГБ), в Западной и Восточной Сибири (табл. 1).

Рис. 1. Страны, в которых извлекают или будут извлекать металлы из нефти

Fig. 1. Extraction of metals from oil by countries



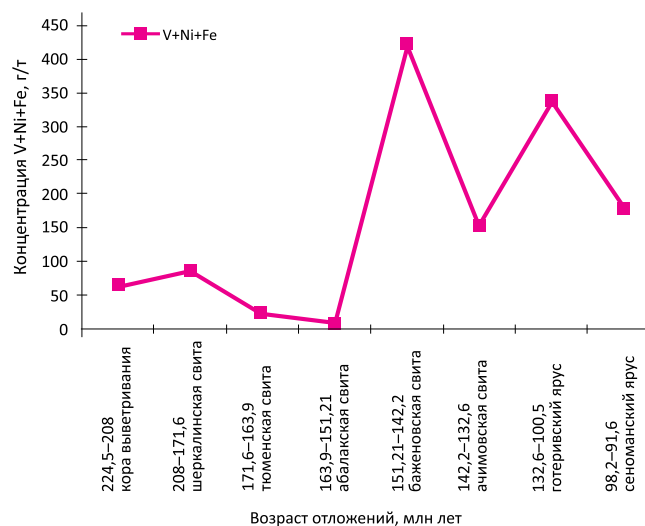
Таб. 1. Среднее содержание металлов в смолисто-асфальтеновых компонентах нефти основных НГБ России, г/т
 Tabl. 1. Average metal content in the resin-asphaltene components of oil in the main oil and gas business of Russia, g/t

Металлы	Среднее содержание металлов в смолисто-асфальтеновых компонентах нефти					
	Днепровско-Припятский	Тимано-Печорский	Волго-Уральский	Западно-Сибирский	Бассейны Восточной Сибири	Среднее значение
Fe	150,480	259,947	109,582	54,276	141,825	143,222
V	28,370	61,635	227,600	26,190	6,109	69,981
Zn	16,183	43,747	49,720	72,282	106,534	57,693
Ni	19,027	56,170	72,016	23,328	14,890	37,086
Cu	6,105	51,804	31,283	15,180	11,974	23,269

Как видно из табл. 1, нефти Западно-Сибирского НГБ занимают среднюю позицию по концентрации металлов в нефти, самые высокие концентрации V и Ni выявлены в нефтях Волго-Уральского НГБ. Как известно [7–9], в России первое место по запасам трудноизвлекаемой нефти занимает баженовская свита Западно-Сибирского НГБ. На рис. 2 показано, что нефти баженовской свиты наиболее обогащены металлами по сравнению с нефтями других разновозрастных свит Западно-Сибирского НГБ, в сумме содержание ванадия, никеля и железа выше 400 г/т. Учитывая вышесказанное, целью работы являлось изучение пространственного распределения физико-химических свойств баженовской нефти с высоким и средним содержанием ванадия и никеля.

Рис. 2. Суммарное содержание металлов в нефти из разновозрастных нефтегазоносных комплексов Западно-Сибирского НГБ

Fig. 2. Total metal content in oil occurring in oil and gas complexes of different ages of the West Siberian oil and gas Basin



Методы и характеристика данных

Основой для анализа металлоносности нефти баженовской свиты в Западной Сибири является информация из базы данных (БД) по физико-химическим свойствам нефти мира, созданной и используемой более трех десятилетий в Институте химии нефти СО РАН [10]. В настоящее время в БД представлено более 45 000 описаний образцов нефти 7247 месторождений из 195 НГБ мира. Нефти баженовской свиты представлены в БД 2833 образцами из 127 месторождений Западной Сибири. Расширенный перечень этих месторождений с залежами баженовской нефти приведен в работах [10–13].

Выборка металлоносной баженовской нефти состоит из 67 образцов 33 месторождений (рис. 3). Перечень этих месторождений с залежами баженовской нефти приведен в табл. 2, где из БД дана общая информация о числе месторождений и образцов в каждом регионе Западно-Сибирской НГБ.

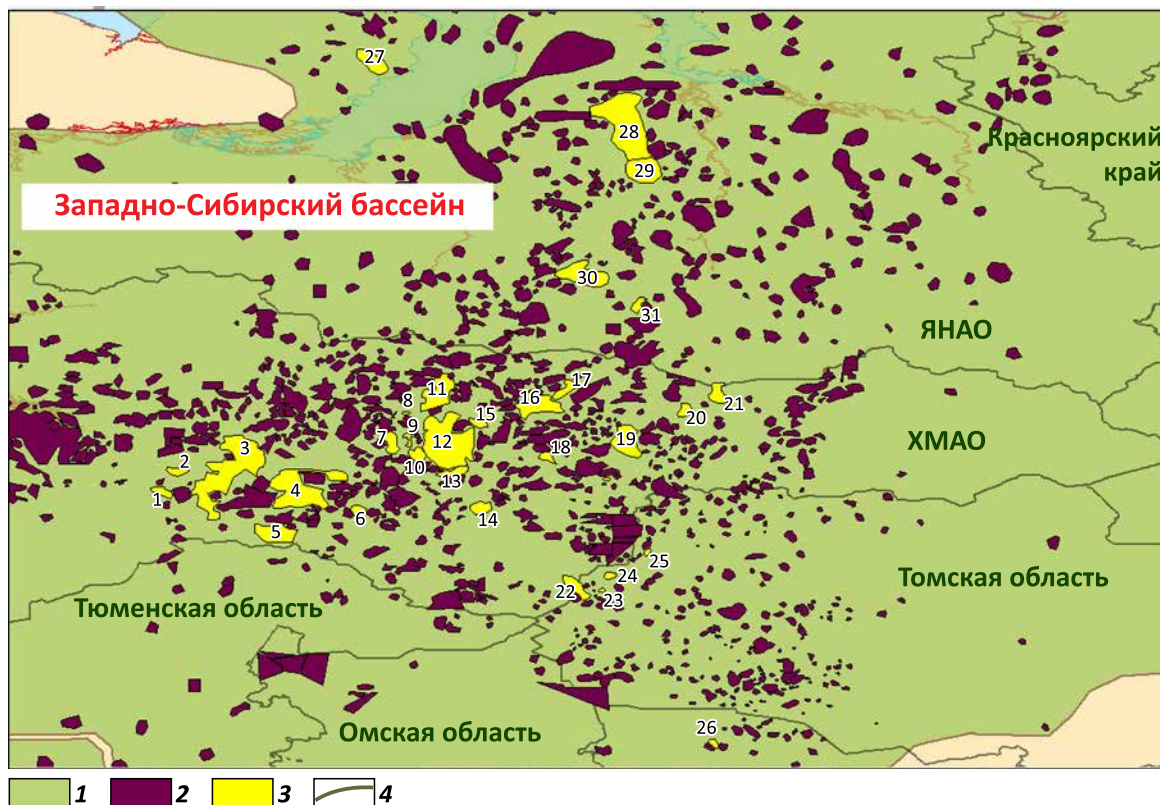
В исследованиях применены методы пространственного анализа данных с использованием средств геоинформационных систем и статистические методы, включая корреляционный анализ данных.

Результаты и обсуждение

Классификация баженовской нефти по содержанию ванадия и никеля

Понятие «ванадиевая» или «никелевая» нефть в настоящий момент не имеет однозначного толкования как в России, так и в мире. Кондиционное содержание ванадия в нефти составляет 30 г/т (или 0,003 %) и никеля 70 г/т (или 0,007 %), данный уровень содержания ванадия и никеля может обеспечивать промышленное получение металлов из УВ-сырья, по рентабельности сопоставимое с его промышленным получением из рудного сырья [2]. В соответствии с содержанием ванадия и никеля в классификации трудноизвлекаемой нефти [10],

Рис. 3. Карта размещения месторождений баженовской свиты с металлоносной нефтью на территории Западно-Сибирского НГБ
 Fig. 3. Map of the distribution of bazhenov suite deposits with metalliferous oil in the territory of the West Siberian oil and gas Basin



1 — НГБ; 2 — УВ-месторождения; 3 — месторождения баженовской свиты с нефтью, обогащенной металлами; 4 — административные границы

1 — oil and gas basins; 2 — oilfields, deposits; 3 — bazhenov suite deposits with metal-rich oil; 4 — administrative boundaries

Месторождения баженовской свиты: 1 — Емьеганское, 2 — Ханты-Мансийское, 3 — Приобское, 4 — Салымское, 5 — Верхне-Салымское, 6 — Мало-Балыкское, 7 — Быстринское, 8 — Сорымское, 9 — Яунлорское, 10 — Западно-Сургутское, 11 — Тевлинско-Русскинское, 12 — Федоровское, 13 — Восточно-Сургутское, 14 — Угутское, 15 — Равенское, 16 — Ватьеганское, 17 — Повховское, 18 — Урьевское, 19 — Самотлорское, 20 — Варьеганское, 21 — Тагринское, 22 — Первомайское, 23 — Катильгинское, 24 — Олень, 25 — Ледовое, 26 — Межовское, 27 — Новопортовское, 28 — Ен-Яхинское, 29 — Уренгойское, 30 — Комсомольское, 31 — Вынгайхинское

Табл. 2. Месторождения баженовской свиты с металлоносной нефтью

Tab. 2. Information on deposits of the Bazhenov formation with metalliferous oil

Регион	Число месторождений, образцов нефтей в БД	Месторождения
Ханты-Мансийский АО	22 месторождения, 49 образцов	Быстринское, Варьеганское, Ватьеганское, Верхне-Салымское, Восточно-Сургутское, Емьеговское, Западно-Сургутское, Мало-балыкское, Мегионское, Повховское, Приобское, Равенское, Салымское, Самотлорское, Сорымское, Тагринское, Тевлинско-Русскинское, Угутское, Урьевское, Федоровское, Ханты-Мансийское, Яунлорское
Ямало-Ненецкий АО	6 месторождений, 13 образцов	Вынгайхинское, Губкинское, Ен-Яхинское, Комсомольское, Новопортовское, Уренгойское
Томская область	4 месторождения, 5 образцов	Катильгинское, Ледовое, Олень, Первомайское
Новосибирская область	1 месторождение, 1 образец	Межовское
Итого	33 месторождения, 68 образцов	

к каковой относятся металлоносные нефти, определены пределы содержания металлов в нефти:

- высокое содержание ванадия — $\geq 0,003$ %, среднее или низкое содержание — $< 0,003$ %;
- высокое содержание никеля — $\geq 0,007$ %, среднее или низкое содержание — $< 0,007$ %

На территории ХМАО установлено 24 образца нефти из 11 месторождений с высоким содержанием ванадия (табл. 3), наибольшим содержанием ванадия обладает нефть Салымского, Западно-Сургутского и Ханты-Мансийского месторождений (концентрация ванадия в нефти 376, 237 и 232 г/т соответственно), содержание никеля в этих месторождениях является средним или низким (см. табл. 3). Следует отметить, что среди нефти баженовской свиты отсутствует нефть с высокой концентрацией никеля (более 0,007 %). Среднее содержание никеля (менее 0,007 %) характерно для нефти Сорымского, Западно-Сургутского и Урьевского месторождений (концентрация никеля в нефти 53, 23 и 20 г/т соответственно).

Табл. 3. Классификация баженовской нефти по концентрации ванадия и никеля

Tab. 3. Classification of Bazhenov oil by concentration of vanadium and nickel

Классификация нефти по содержанию металлов	Среднее значение, %	Пределы изменения, %	Число образцов
Высокое содержание ванадия (более 0,003 %)	0,0098	0,0036–0,0376	24
Среднее или низкое содержание ванадия (менее 0,003 %)	0,0008	0,00001–0,0026	44
Среднее или низкое содержание никеля (менее 0,007 %)	0,0007	0,00001–0,0053	47

Ранее были установлены типы НГБ, учитывающие наибольшие концентрации металлов в отношении V/Ni: если содержание ванадия превышает содержание никеля в нефти ($V/Ni > 1$), то НГБ относится к ванадиевому типу, если содержание ванадия меньше содержания никеля в нефти ($V/Ni < 1$), то НГБ относится к никелевому типу. Западно-Сибирский бассейн характеризуется доминированием ванадиевых соединений в нефти ($V/Ni = 1,50$), для баженовской нефти это отношение в 4 раза больше и равно 5,71.

По классификации из работ [14, 15] нефтяные залежи делятся на «обедненные» или «обогащенные» металлами. К первому типу относится нефть, если суммарная концентрация металлов ниже 1 г/т. «Обогащенной» можно назвать ту нефть, в которой суммарное содержание металлов выше 10 г/т. Исследуемая нефть имеет суммарную концентрацию ванадия и никеля 3004 г/т, что свидетельствует о высоком содержании тяжелых металлов в нефти и нефть баженовской свиты в целом относится к «обогащенной».

В табл. 4 представлены данные о наиболее уникальных и крупных по своим ресурсам месторож-

Табл. 4. Распределение по запасам месторождений баженовской свиты с металлоносной нефтью

Tab. 4. Distribution by reserves of Bazhenov formation deposits with metalliferous oil

Месторождение	Содержание ванадия, %	Содержание никеля, %
Уникальные (более 300 млн т нефти)		
Самотлорское	0,0020	0,0011
Приобское	0,0041	0,0005
Федоровское	0,0068	0,0008
Уренгойское	0,0001	0,0001
Повховское	0,0011	–
Ватьеганское	0,0020	0,0015
Салымское	0,0136	0,0006
Крупные (от 30 до 300 млн т нефти)		
Тевлинско-Русское	0,0007	–
Новопортовское	0,0006	0,0008
Вынгайхинское	0,0001	0,0001
Малобалькское	0,0022	0,0003
Комсомольское	0,0016	0,0003
Урьевское	0,0017	0,0020
Западно-Сургутское	0,0096	0,0010
Первомайское	0,0006	–
Быстринское	0,0075	–
Средние (от 10 до 30 млн т нефти)		
Верхне-Салымское	0,0043	0,0006
Олень	0,0005	0,0001
Тагринское	0,0001	0,0005
Угутское	0,0013	–
Катильгинское	0,0002	–
Мелкие (от 1 до 10 млн т нефти)		
Равенское	0,0084	–
Ледовое	0,0001	0,0001
Восточно-Сургутское	0,0055	0,0005

дениях баженовской свиты со средним значением концентраций ванадия и никеля.

Особенности пластовых характеристик металлоносной нефти баженовской свиты

Средние значения пластовых характеристик баженовских отложений представлены в табл. 5. Как видно из табл. 5, пористость пластов варьируется от 14 до 28 %, проницаемость — от сотых долей до 1,5 мкм², широкий диапазон изменений характерен и для термобарических показателей — пластовая температура изменяется от 56 до 110 °С, пластовое давление — от 20 до 38 МПа. Согласно [10], трудноизвлекаемая нефть характеризуется высокими либо низкими значениями пластовых температур и давления. «Горячая» баженовская нефть (пластовая температура выше 100 °С) характерна для Салымского и Урьевского месторождений нефти на территории ХМАО. Нефть баженовской свиты с низкой пластовой температурой (менее 20 °С) не выявлена.

Табл. 5. Пластовые характеристики металлоносной баженовской нефти

Tab. 5. Reservoir characteristics of the occurrence of metalliferous Bazhenov oil

Пластовые характеристики	Среднее значение	Пределы изменения	Число образцов
Температура пласта, °С	83,63	56,00–110,00	19
Давление пласта, МПа	25,44	20,00–37,60	19
Проницаемость, мкм ²	0,30	0,02–1,49	10
Пористость, %	20,05	14,00–28,00	11

Проницаемость и пористость оказывают непосредственное влияние на режим разработки и выбор применяемых технологий извлечения нефти. Как видно из табл. 6, большинство образцов исследуемой нефти находится в среднепроницаемых (от 0,05 до 0,5 мкм²) и высокопористых (более 15 %) коллекторах. Данные свойства пород характерны, например, для коллекторов Уренгойского (ЯНАО), Мегионского, Самотлорского, Урьевского и Яунлорского (ХМАО) месторождений. Вынгаяхинское (ЯНАО) и Ледовое (Томская область) месторождения отличаются низкой проницаемостью — коллекторы этих месторождений являются низкопроницаемыми (менее 0,05 мкм²).

Сравнительный анализ геолого-физических и химических характеристик металлоносных баженовских нефтей

Как известно, изменения геолого-физических условий залегания баженовской нефти в залежах отражаются на ее геологических и физико-химических параметрах. Плотность, вязкость, температура застывания, содержание смол, серы, асфальтенов, парафинов, тяжелых металлов усложняют добычу, транспортировку и переработку, а также вызывают негативные экологические последствия. Как упоминалось выше, самой эффективной и приоритетной технологией повышения нефтеотдачи и добычи баженовской нефти, но в тоже время самой экологически опасной технологией является гидравлический разрыв пласта, который требует широких знаний об условиях залегания нефти, о пластовых характеристиках пород, ее физико-химических свойствах, особенно для нефти баженовской свиты, обогащенной тяжелыми металлами.

Информативной физической величиной является плотность, на ее значение оказывают влияние все компоненты, входящие в состав нефти пропорционально их концентрации. Плотность нефти является одним из главных факторов определения трудноизвлекаемости нефти. По имеющимся данным, металлоносная баженовская нефть по общим физико-химическим характеристикам имеет значительные различия. Так, плотность меняется от 0,811 (месторождение Губкинское, ЯНАО) до 0,915 г/см³ (месторождение Новопортовское, ЯНАО), среднее значение плотности равно 0,860 г/см³. Вариации плотности влияют на изменения физико-химических параметров, таких как содержание смол — от 2,3 % (месторождение Губкинское, ЯНАО) до 19,1 % (месторождение Западно-Сургутское, ХМАО), асфальтенов — от 0,12 % (месторождение Губкинское, ЯНАО) до 5,5 % (месторождение Сорымское, ХМАО), парафинов — от 1,3 % (месторождение Олень, Томская область) до 7,63 % (месторождение Губкинское, ЯНАО), серы — от 0,02 % (месторождение Салымское, ХМАО) до 2,5 % (месторождение Западно-Сургутское, ХМАО). Вязкость нефти имеет также широкие границы изменений — от 3,16 мм²/с (месторождение Губкинское, ЯНАО) до 82,1 мм²/с (месторождение Федоровское, ХМАО), среднее значение вязкости при 20 °С составляет 17,79 мм²/с. Положительная температура застывания для металлоносной нефти баженовской свиты не установлена, большинство образцов нефти имеют отрицательную температуру застывания — от -1 до -48 °С.

По значению плотности выделено 3 группы металлоносной баженовской нефти: легкая (плотность менее 0,84 г/см³), средняя (плотность от 0,84 до 0,88 г/см³) и тяжелая (плотность более 0,88 г/см³).

Усредненные значения пластовых характеристик и основных физико-химических показателей исследуемой нефти каждой группы приведены в табл. 6. Наибольшее число образцов выделено во второй группе средней по плотности нефти, доля ее составила 50 %, доля тяжелой нефти — 27,6 %, самая малочисленная группа — это легкая нефть, доля которой составила 22,4 %. Распределение запасов нефти следующее: наибольшие запасы сосредоточены в группе месторождений со средней по плотности нефтью (57,3 %, Приобское, Самотлорское, Ватгганское и др.), 31,6 % запасов находится в группе с тяжелой нефтью (Федоровское, Новопортовское, Салымское и др.), 11,1 % — это запасы легкой нефти (Повховское, Уренгойское, Вынгайхинское и др.). По данным табл. 6 наблюдается четкая взаимосвязь между изменениями плотности нефти и основными ее реологическими и физико-химическими показателями. Тяжелая баженовская нефть залегают на меньших глубинах с низкими показаниями пла-

стовых температуры и давления, коллекторы имеют низкую проницаемость и высокую пористость. Легкая нефть залегают в более глубоких пластах с самыми высокими значениями температуры и давления. Средняя по плотности нефть находится в породах с самыми высокими значениями проницаемости и пористости.

Показано, что при увеличении плотности от группы легкой нефти до группы тяжелой увеличивается вязкость нефти почти в 10 раз, температура застывания в среднем повышается в 2 раза, содержание серы, смол и асфальтенов увеличивается более чем в 3 раза, содержание газа в нефти при этом уменьшается примерно на порядок. Содержание парафинов почти стабильное в разных группах, более высокое наблюдается в группе легкой нефти. Тяжелая нефть, согласно классификации нефти по физико-химическим свойствам [10], может быть отнесена к классу мало- или средневязкой нефти (вязкость менее 35 мм²/с). По содержанию серы,

Табл. 6. Средние значения физико-химических показателей металлоносной нефти баженовской свиты в зависимости от плотности
Tab. 6. Average values of physico-chemical parameters of metalliferous oil of the Bazhenov formation depending on density

Физико-химические показатели	Легкие нефти	Средние нефти	Тяжелые нефти
Условия залегания			
Глубина залегания, м	2512	2369	2086
Пластовая температура, °С	89,83	42,47	26,78
Пластовое давление, МПа	28,37	11,78	9,47
Проницаемость, мкм ²	0,14	0,40	0,008
Пористость, %	17,20	19,49	16,67
Физические показатели			
Плотность, г/см ³	0,8274	0,8558	0,8955
Вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,31	6,76	25,81
Вязкость при 50 °С, мм ² /с	1,74	2,92	11,15
Температура застывания, °С	-26,67	-13,21	-12,07
Химические показатели			
Содержание серы, мас. %	0,39	0,65	1,54
Содержание парафинов, мас. %	3,72	3,23	1,87
Содержание смол, мас. %	5,32	7,09	9,58
Содержание асфальтенов, мас. %	0,66	1,24	1,53
Газосодержание в нефти, м ³ /т	350,00	69,50	21,02
Содержание ванадия, мас. %	0,0003	0,0015	0,0065
Содержание никеля, мас. %	0,0002	0,0006	0,0006

парафинов, смол, асфальтенов эта нефть является сернистой, среднепарафиновой, среднесмолистой и малоасфальтеновой, с низким и средним газосодержанием.

Проведен статистический анализ данных и рассчитаны коэффициенты парной корреляции. Зафиксирована положительная корреляция между ванадием и никелем, что можно объяснить их концентрациями в ванадилпорфириновых комплексах ОВ пород. Положительная корреляция выявлена между плотностью и вязкостью, парафинами, серой, смолами и асфальтенами, между ванадием и серой, никелем и серой.

Заключение

Полноценная добыча трудноизвлекаемой баженовской нефти в скором будущем станет двигателем разработки и внедрения высоких технологий во многих отраслях промышленности — от тяжелого машиностроения до микроэлектроники, искусственного интеллекта и цифрового моделирования. На примере баженовской свиты будут разрабатываться ресурсы с трудноизвлекаемой неф-

тью в доманиковых отложениях в Волго-Уральском и Тимано-Печорском НГБ, в куонамских отложениях Восточной Сибири, в ходумских — на Кавказе.

Выделение металлов из нефти является важной проблемой. В статье показана локализация месторождений баженовской свиты с металлоносной нефтью. Дана оценка средних содержаний ванадия и никеля в нефти и выявлена степень их концентрирования по классификации содержания металлов в нефти. Показаны пределы изменения содержания ванадия и никеля в ряду от легкой до тяжелой нефти баженовской свиты на примере 33 месторождений Западно-Сибирского НГБ.

В связи с этим для разработки новых технологий добычи, транспортировки и рентабельной переработки металлоносной нефти баженовской свиты необходимо знание широкого круга исследований по оценке условий залегания, геолого-физических характеристик отложений, физико-химических свойств металлоносной нефти, что подчеркивает актуальность данной работы, а результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях нефтедобычи и увеличения нефтеотдачи трудноизвлекаемых запасов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031500048-1).

Список источников

1. Хаджиев С.Н., Шпирт М.Я. Микроэлементы в нефтях и продуктах их переработки. — М.: Наука, 2012. — 222 с.
2. Яценко И.Г. Тяжелые ванадиевые нефтяные ресурсы России // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — Т. 321. — № 1. Наука о Земле. — С. 105–111.
3. Жакишева А.А. Пути рационального использования углеводородных ресурсов в нефтедобывающих регионах // Фундаментальные исследования. — 2012. — № 6–1. — С. 218–223.
4. Магомедов Р.Н., Попова А.З., Марютина Т.А., Кадиев Х.М., Хаджиев С.Н. Состояние и перспективы деметаллизации тяжелого нефтяного сырья (обзор) // Нефтехимия. — 2015. — Т. 55. — № 4. — С. 267–290. DOI: 10.7868/S0028242115040097.
5. Зайниддинова М.Х. Извлечение соединений металлов из тяжелых нефтяных фракций // Нефтяная столица. Сборник материалов Седьмого международного молодежного научно-практического форума (Ханты-Мансийск, 3–4 апреля 2024 г.). — Ханты-Мансийск: Центр научно-технических решений, 2024. — С. 114–119.
6. Несын Г.В. Вредные/полезные микроэлементы в нефти // Трубопроводный транспорт — 2024. Материалы XIX Международной научно-практической конференции (Уфа, 20–22 ноября 2024 г.) / под общ. ред. И.Г. Ибрагимова. — Уфа: УГНТУ, 2024. — Т. 2. — С. 37–40.
7. Конторович А.Э., Родякин С.В., Буриштейн Л.М., Костырева Е.А., Рыжкова С.В., Ян П.А. Пористость и нефтенасыщенность пород баженовской свиты // Геология нефти и газа. — 2018. — № 5. — С. 61–73. DOI: 10.31087/0016-7894-2018-5-61-73.
8. Ларионова Е.И., Чинаева Т.И., Шпаковская Е.П. Анализ развития нефтегазового сектора в современных условиях // Статистика и экономика. — 2019. — Т. 16. — № 6. — С. 29–36. DOI: 10.21686/2500-3925-2019-6-29-36.
9. Прищепа О.М. Состояние сырьевой базы и добычи трудноизвлекаемых запасов нефти в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2019. — № 5 (168). — С. 14–20.
10. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и закономерности размещения. — Томск: В-Спектр, 2014. — 154 с.
11. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Физико-химические свойства нефтей с высоким содержанием парафинов в Арктической зоне России // Башкирский химический журнал. — 2023. — Т. 30. — № 1. — С. 104–110. DOI: 10.17122/bcj-2023-1-104-110.
12. Яценко И.Г. Пластовые условия залегания трудноизвлекаемых нефтей баженовской свиты и их физико-химические свойства // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. — 2023. — Т. 66. — № 11. — С. 6–17. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.9t.
13. Yashchenko I.G. Features of Occurrence Conditions of the Bazhenov, Domanik and Kuonamka Sediments in Oil and Gas Basins of Russia // Chemistry for Sustainable Development. — 2024. — Vol. 32. — No. 2. — pp. 217–226. DOI: 10.15372/CSD2024552.

14. Пуанова С.А. Особенности накопления в нафтидах ванадия и никеля [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 3 (22). – 2. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36541986> (дата обращения: 01.04.2025).
15. Цомбуева Б.В., Сохорова З.В., Фадеева И.Ю., Убушаева Б.В. Микроэлементная характеристика сырых нефтей ряда месторождений Республики Калмыкия // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 1. – С. 18–23.

References

1. Khadzhiev S.N., Shpirt M.Ya. Mikroehlementy v neftiyakh i produktakh ikh pererabotki [Microelements in oils and petrochemical products]. Moscow: Nauka; 2012. 222 p.
2. Yashchenko I.G. Tyazhelye vanadievonosnye nefti Rossii [Heavy vanadium-enriched oils of Russia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2012;321(1):105–111.
3. Zhakishcheva A.A. Ways of rational use of hydrocarbonic resources to oil-extracting regions. *Fundamental Research*. 2012;(6–1):218–223.
4. Magomedov R.N., Popova A.Z., Maryutina T.A., Kadiev K.M., Khadzhiev S.N. Current status and prospects of demetallization of heavy petroleum feedstock (review). *Petroleum Chemistry*. 2015;55(6):423–443. DOI: 10.1134/S0965544115060092.
5. Zayniddinova M.Kh. Extraction of metal compounds from heavy oil fractions. In: Oil Capital. Collection of works of the Seventh International Youth Appliedresearch Forum (Khanty-Mansiysk, 3–4 April 2024). Khanty-Mansiysk: Tsentr nauchno-tekhnicheskikh reshenii; 2024. pp. 114–119.
6. Nesyn G.V. Vrednye/poleznye mikroehlementy v nefiti [Harmful/useful microelements in oil]. In: Truboprovodnyi transport – 2024. Materialy XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Ufa, 20–22 noyabrya 2024 g.). Ibragimov I.G., ed. Ufa: UGNTU; 2024. Vol. 2. pp. 37–40.
7. Kontorovich A.E., Rodyakin S.V., Burshtein L.M., Kostyreva E.A., Ryzhova S.V., Yan P.A. Porosity and oil saturation of pore space in the Bazhenov formation rocks. *Russian Oil And Gas Geology*. 2018;(5):61–73. DOI: 10.31087/0016-7894-2018-5-61-73.
8. Larionova E.I., Chinaeva T.I., Shpakovskaya E.P. Analysis of the development of oil and gas industry in present conditions. *Statistics and Economics*. 2019;16(6):29–36. DOI: 10.21686/2500-3925-2019-6-29-36.
9. Prischeva O.M. The current state of the raw material base and production of hard-to-recover oil reserves in Russia. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2019;(5):14–20.
10. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Trudnoizvlekaemye nefti: fiziko-khimicheskie svoystva i zakonomernosti razmeshcheniya [Hard-to-recover oils: physical and chemical properties and distribution patterns]. Tomsk: V–Spektr; 2014. 154 p.
11. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Physicochemical properties of oils with high paraffin content in the Russian Arctic zone. *Bashkir Chemical Journal*. 2023;30(1):104–110. DOI: 10.17122/bcj-2023-1-104-110.
12. Yashchenko I.G. Formation conditions of occurrence of hard-to-recover oils of the Bazhenov formation and their physico-chemical properties. *ChemChemTech*. 2023;66(11):6–17. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.9t.
13. Yashchenko I.G. Features of Occurrence Conditions of the Bazhenov, Domanik and Kuonamka Sediments in Oil and Gas Basins of Russia. *Chemistry for Sustainable Development*. 2024;32(2):217–226. DOI: 10.15372/CSD2024552.
14. Punanova S.A. Peculiarities of accumulation in naphthydes of vanadium and nickel. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2018;(3):2. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36541986> (accessed 01.04.2025).
15. Tsombueva B.V., Sokhорова Z.V., Fadeeva I.Yu., Ubushaeva B.V. Trace element characteristics of crude oils of some deposits of the Republic of Kalmykia. *Advances in current natural sciences*. 2019;(1):18–23.

Статья поступила в редакцию 06.02.2025 г., одобрена после рецензирования 09.03.2025 г., принята к публикации 01.06.2025 г.
The article was submitted 06.02.2025; approved after reviewing 09.03.2025; accepted for publication 01.06.2025.

Информация об авторах

Ященко Ирина Германовна

Кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией
Институт химии нефти СО РАН
634055 Томск, пр-кт Академический, д. 4
e-mail: sric@ipc.tsc.ru
ORCID: 0000-0001-6736-8780
Scopus ID: 6506564857
SPIN-код: 1404-4011
AuthorID: 69782

Information about authors

Irina G. Yashchenko

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences
Laboratory Head
Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS
4, Akademicheskyy Ave, Tomsk, 634055, Russia
e-mail: sric@ipc.tsc.ru
ORCID: 0000-0001-6736-8780
Scopus ID: 6506564857
SPIN-код: 1404-4011
AuthorID: 69782