



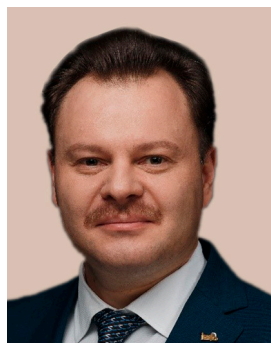
## ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ВАНАДИЯ И НИКЕЛЯ ИЗ НЕФТИ, АНАЛИЗ МИРОВЫХ ТЕНДЕНЦИЙ

*Темпы потребления металлов растут с каждым годом. Продолжающийся спрос на ископаемые энергоресурсы, экологические и климатические проблемы означают, что экономике для развития технического прогресса и перехода на экологически чистые технологии требуются дешевые и доступные возобновляемые источники энергии, способные решить проблемы её накопления и сохранения.*

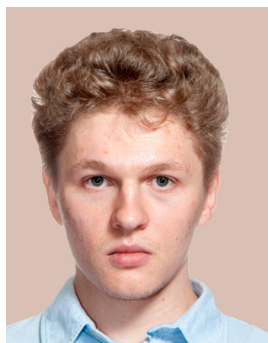
*Решением проблемы восполнения минерально-сырьевой базы (МСБ) редкоземельными, щелочными и переходными металлами может стать их добыча в качестве попутных компонентов, получаемых при добыче нефти. Правительством Российской Федерации разрабатываются меры регулирования лицензирования добычи минералов, металлов и других химических элементов, и их соединений, заключенных в полезных ископаемых и которые не имеют определяющего значения для промышленной оценки месторождения, но при переработке основных полезных ископаемых могут быть рентабельно извлечены и использованы.*

*В данной работе рассматривается потенциал нефти, как источника промышленных объёмов редкоземельных металлов и возможная экономическая перспективность их извлечения.*

**Ключевые слова:** попутные компоненты, ванадий, никель, нефть, редкоземельные металлы, минерально-сырьевая база.



**Фомкин А.В.**  
д.т.н.  
АО «Зарубежнефть»,  
начальник управления  
инновационного  
развития  
afomkin@nestro.ru



**Сергеев А.Д.**  
РГУ нефти и газа (НИУ)  
имени И.М. Губкина  
biturd8@gmail.com

Нехватка редких и редкоземельных металлов и нестабильность цен на мировых рынках оказывают влияние на многие сектора современной экономики. Речь идет не только о крупных создающих большую добавленную стоимость гражданских отраслях, но и об оборонной промышленности и технологиях, способных обеспечить импортозамещение, а также технологический суверенитет.

Так, ванадий и никель являются первыми металлами, обнаруженными в нефти. Выделяют ванадиевые (V>Ni) и никелевые (Ni>V) типы нефтей. Согласно работам Пунановой и Якуцени, концентрации этих металлов в нефти отдельных месторождениях сопоставимыми с содержаниями металлов в рудах [1].

Ванадий и никель встречаются в нефти в виде металлопорфириновых комплексов, структура ванадилпорфиринов и никелпорфиринов

в литературе подробно описана. Однако, условия образования металлопорфиринов никеля и ванадия точно не установлены и нуждаются в дополнительных исследованиях.

Актуальной задачей является создание востребованных технологий для вовлечения нефти в процесс глубокой переработки и извлечения из нее ванадия и никеля. Целью работы является обобщить последние тренды добычи и потребления, а также показать перспективность добычи попутно извлекаемых запасов металлов из нефтяных месторождений.

**Ванадий**

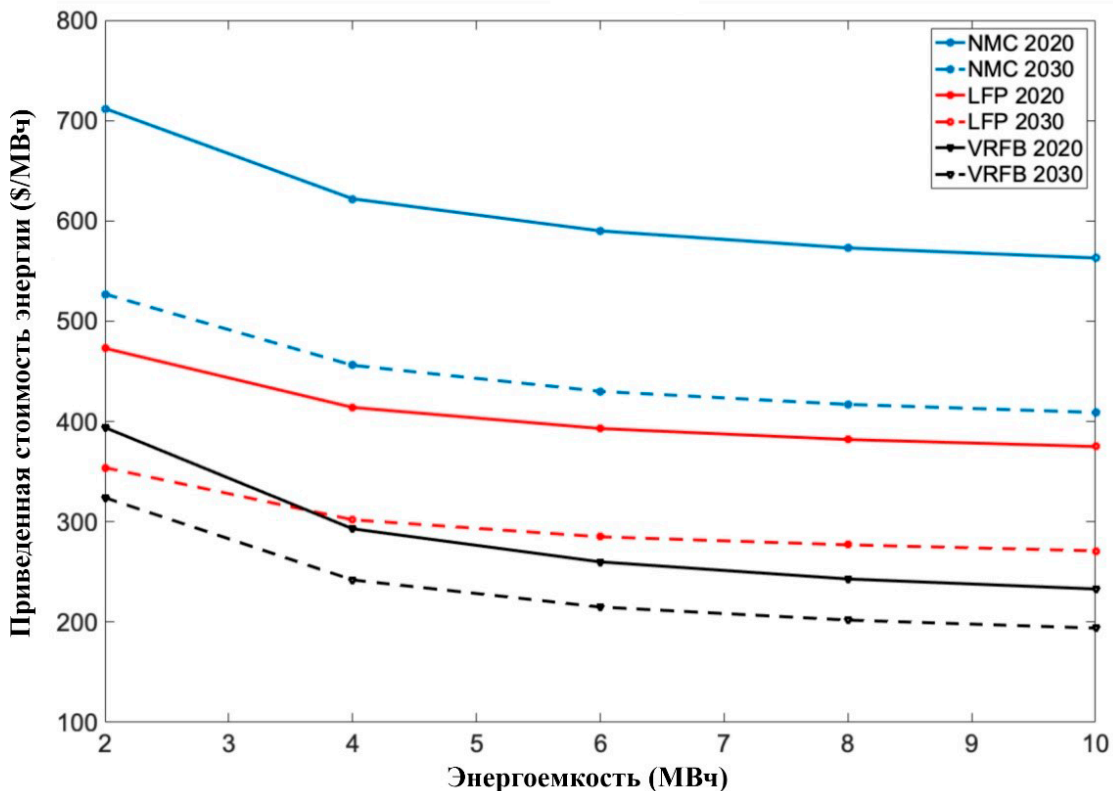
Ванадий относится к группе переходных металлов и в природе в свободном виде не встречается. Характеризуется высокими температурами плавления и кипения, устойчивостью

к коррозии, за счёт чего используется для повышения прочности стали и других металлов.

Ванадий необходим при переходе с ископаемого топлива на низкоуглеродную экономику. Например, ванадиевые окислительно-восстановительные батареи (далее VRFB) характеризуются относительно высокой эффективностью длительного хранения энергии (*рис.1*), а их производство легко масштабируется в сравнении с литиево-железно фосфатными (LFP) и никель-металлогидридными (NMC) батареями. Однако, на сегодняшний день VRFB менее мощные в сравнении с литий-ионными батареями.

Согласно данным из открытых источников, к 2031 году глобальное годовое развертывание VRFB достигнет примерно 32,8 ГВт/ч в год, для чего потребуется добыча около 130 тыс. т ванадия в год, динамика потребления приведена на

**Приведенная стоимость энергии систем мощностью 1 МВт к энергоемкости**



- показатели никель-металлогидридных батарей (NMC) в 2020 году
- - - показатели никель-металлогидридных батарей (NMC) в 2030 году
- показатели литиево-фосфатных батарей (LFP) в 2020 году
- - - показатели литиево-фосфатных батарей (LFP) в 2030 году
- показатели ванадиевые окислительно-восстановительные батарей (VRFB) в 2020 году
- - - показатели ванадиевые окислительно-восстановительные батарей (VRFB) в 2030 году

**Рис.1.** Приведенная стоимость энергии систем 1 МВтч к энергоемкости.

**рис. 1.** VFRB – не единственный драйвер спроса на ванадий. Около 90 % спроса на ванадий приходится на сталелитейную промышленность, около 6-7 % – на химическую промышленность и около 2-3 % – на производство титановых сплавов.

Самым продуктивным, на сегодняшний день, способом добычи ванадия, обеспечивающим около 70% его мировых потребностей, является переработка шлака, получаемого при выплавке стали, а также переработка магнетитовых руд, содержащих ванадий. Образующий побочный продукт содержит от 14 до 24% триоксида ванадия, **рис. 2.**

Вторым по объёмам добычи идёт разработка первичных источников: магнетитовых рудных тел, содержащих ванадий-титан (например, в Южной Африке, Бразилии и Китае).

Наименьшим по объёмам добычи являются вторичные методы извлечения, в которых ванадий (и другие микроэлементы, такие как никель) извлекается из углеводородов. Например, из высоковязких тяжелых нефтей, природных битумов, нефтяных остатков или из продуктов переработки отработанных катализаторов, используемых при переработке сырой нефти. Подробнее о способах извлечения металлов из нефтей далее.

По оценке экспертов, мировые потенциальные ресурсы ванадия в тяжелой нефти и битумах составляют примерно 125 млн т, а извлекаемые попутно с нефтью – около 20 млн т. Изучение состава тяжелой нефти показало, что содержа-

щийся в них ванадий качественно превосходит получаемый аналог из руды, поэтому ведущие страны предпочитают использовать именно такой ванадий в инновационных технологиях. Так, Канада и Япония полностью получают ванадий из тяжелой нефти. В США удельный вес извлечения ванадия из нефти превышает 80%.

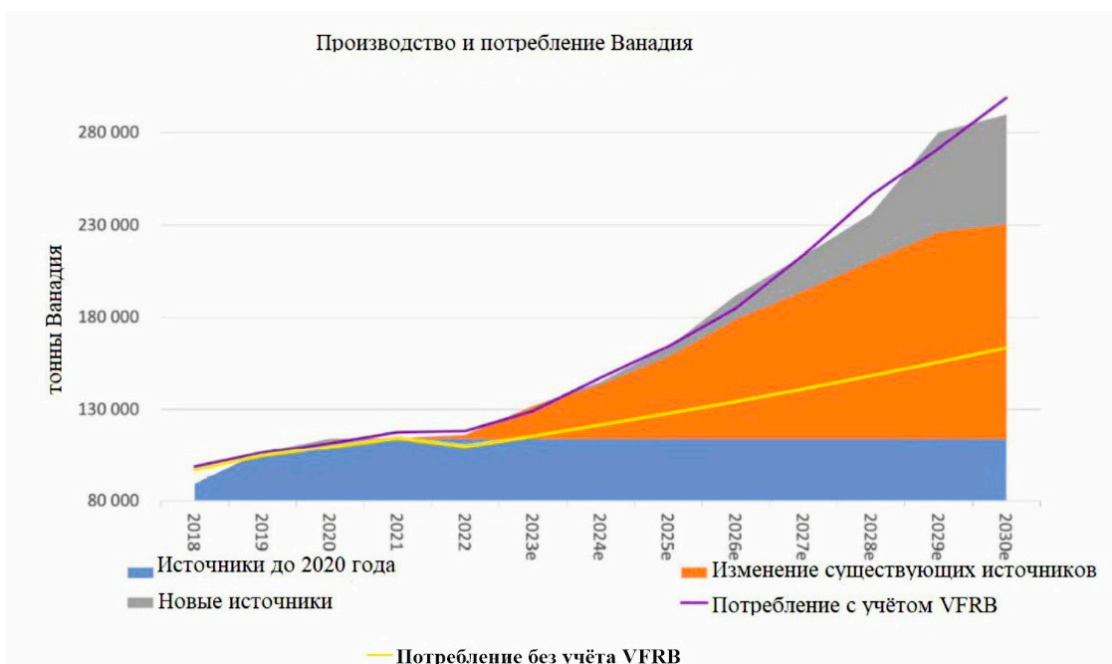
За 2023 в мире было добыто примерно 110 тыс. т ванадия. Согласно статистическим данным по основным странам производителям [2], представленным ниже, Китай стал крупнейшим производителем ванадия в мире:

- Китай: 68 тыс. т;
- Россия: 20 тыс. т;
- Южная Африка: 9,1 тыс. т;
- Бразилия: 6,4 тыс. т.

### Никель

Мировое потребление никеля растёт с 2009 года. Наиболее важным рынком использования никеля является сектор нержавеющей стали, на него приходится более 70% потребления. Однако растущая электрификация автомобилей, привела к многократному увеличению производства литиевых аккумуляторов. Из-за этого, рынок никеля развивается в виде двух обособленных потоков. Первый – традиционное использование при производстве нержавеющей стали, второй – глобальный переход на использование возобновляемых источников энергии. Спрос на никель имеет тенденцию к росту

Главный бенефициар аккумуляторного бума – Индонезия. Исторически Индонезия была круп-



**Рис.2.** Производство и потребление ванадия.

ным поставщиком сначала никелевой руды, а затем никелевого чугуна для производства нержавеющей стали в Китае. В настоящее время Индонезия активно использует свои огромные запасы никеля для стимулирования инвестиций в металл для аккумуляторов [5].

По данным International Nickel Study Group (INSG) за 2023 год в мире было суммарно добыто никеля 242,8 тыс т.

**Методы деметаллизации нефти**

На сегодняшний день разработаны и применяются разные варианты переработки тяжелых нефтей:

1. Непосредственно на промысле, извлеченная из пласта тяжелая нефть сперва сепарируется, обессоливается и затем поступает на битумный завод, где перерабатывается в синтетическую или полусинтетическую нефть. Конечным результатом на выходе получается продукт, соответствующий требованиям транспортировки по системе магистральных нефтепроводов. Современные нефтеперерабатывающие заводы комбинируют технологии получения синтетических нефтей, но существует проблема – действующие мощности не позволяют выполнять глубокую переработку нефти. Так, переработка сепарированных остатков (объем которых может превышать более половины массы сырья), природных битумов с получением более лёгких фракций углеводородов прямо на промысле способствует снижению потребления в производстве специальных дорогостоящих каталитических добавок.

В дальнейшем сепарированные остатки, содержащие ванадий, могут использоваться в промышленном производстве ванадия и никеля, что увеличивает стоимость и качество нефтяного сырья после такой переработки по сравнению первоначальными характеристиками извлеченной из пласта тяжелой нефти [45,13].

Дальнейшая транспортировка остатков, содержащих рентабельную концентрацию ванадия, никеля и других редких металлов в этом случае, зависит от органолептических свойств тяжелой нефти, запасов того или иного месторождения с учётом технологий разработки и логистических возможностей территории.

2. Глубокая переработка тяжелых нефтей на современных нефтеперерабатывающих заводах выполняется на комплексных технологических установках и агрегатах путём многостадийных физических и химических процессов, где конечным продуктом будет широкий спектр различных нефтепродуктов.

В дальнейшем решение о деметаллизации поступившей на переработку нефти принимается в зависимости от процентного содержания в ней ванадия, никеля и других редких металлов. Например, переработка рентабельна при содержании пентаоксида ванадия (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) не менее 1,0 массовых процентов в поступившем на переработку остатке, так как этот показатель выше, чем в промышленных рудах [13].

3. Извлечение редких и редкоземельных металлов из тяжелых нефтяных остатков при помощи реагентов различных кислот, растворителей



Рис.3. Производство ванадия.



Таблица 1.

Характеристика основных процессов переработки тяжелых нефтей и их остатков.

Способ удаления	Экстракционный	Адсорбционный	Каталитический	Гидрогенизационный	Термический	Комбинированный
Суть извлечения металлов	Извлечение металлов из нефтяного сырья в составе смолисто-асфальтовых веществ, отделяемых от нефтяного сырья с помощью коагулянтов	Извлечение металлов из нефтяного сырья с помощью адсорбентов, дополняемое термообработкой	Разрушение металлосодержащих соединений в присутствии расплавленного катализатора и осаждение металлов на нем	Разрушение металлосодержащих соединений гидрогенизационной переработкой в присутствии катализатора	Термическое разрушение металлосодержащих соединений и концентрирование металлов в остатках термолитиза, в коксе, на поверхности твердых теплоносителей	Разрушение металлосодержащих соединений гидрогенизационной переработкой без катализатора
Название процесса	Деасфальтизация растворителями	Адсорбционная очистка; селективная очистка; адсорбционно-каталитическая очистка	Каталитический крекинг	Гидроочистка; гидрокрекинг	Висбрекинг; термический крекинг; замедленное коксование; термоконтактный крекинг со сжиганием или газификацией кокса	Гидровисбрекинг; гидрокрекинг; гидропирилиз; донорно-солювентный крекинг
Степень превращения сырья с Тн.к. >350°С, мас. %	0–50 (выход деасфальгизата)	0–50	До 80	До 95*	5–75	20–90
Степень извлечения металлов, %	70–80	80–95	80–96	60–98	70–80	60–80
Вид получаемого концентрата металлов	Асфальт	Обогащенный металлами адсорбент	Обогащенный металлами отработанный катализатор	Обогащенный металлами отработанный гетерогенный катализатор, высококипящие фракции и кокс	Крекинг-остаток, кокс, обогащенный металлами твердый теплоноситель	Тяжелый остаток процесса

\* Степень превращения сырья с температурой кипения выше 550°С.

(кетоны, простые и сложные эфиры, спирты), щелочей, солей, гетероатомов.

На этапе первичной сепарации нефти, главной задачей является разделение нефти от тяжелых и редкоземельных (попутных) элементов.

В случае с ванадием, на начальном этапе подготовки нефти из неё извлекается пентаоксид ванадия (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), который в виде бесцветной жидкости обсаживается с аммиаком (NH<sub>4</sub>) в результате получается кристаллический порошок желто-красного цвета, который в дальнейшем участвует в производстве феррованадия – ключевого компонента производства легированной стали. Либо, пятиокись ванадия может использоваться в качестве положительного электрода (катода) при производстве литиевых батарей и аккумуляторов.

В случае с никелем, получившийся в ходе деметаллизации карбонил никеля (NiCO<sub>4</sub>) термически обрабатывается, в результате получается чистый металл и угарный газ.

Главным недостатком этих методов является низкая осаждаемость асфальтенов, в результате чего растут затраты, дополнительные расходы на снижение плотности, вязкости, коксуемости и удаления гетероатомов из сырья [13]. Сравнительная характеристика основных процессов переработки тяжелых нефтяных остатков приведена в **табл. 1**.

Общей тенденцией развития технологий деметаллизации тяжелой нефти и тяжелых нефтяных остатков является максимальное концентрирование ванадия, никеля и других редких металлов в остатках после сепарации, с применением общедоступных технологических процессов переработки тяжелой нефти и тяжелых нефтяных остатков, в том числе сольвентно-адсорбционных процессов, термодеструктивных, каталитических процессов крекинга, гидроконверсии[13]. После получения остатков глубокой переработки тяжелой нефти и тяжелых нефтяных остатков, обогащенной ванадием, никелем и/или другими редкими металлами, с осажденными на катализаторах/адсорбентах металлами применяют специальные методы их извлечения. Таким образом, частичную деметаллизацию тяжелой нефти целесообразнее проводить на стадии подготовки к транспортировке для переработки, с последующей деметаллизацией на электрообессоливающих установках непосредственно на нефтеперерабатывающих заводах.

#### Примеры

В России основными нефтяными нефтедобывающими регионами являются Западная и Восточная Сибирь, Тимано-Печорская и Волго-Уральская нефтегазоносные провинции.

**Таблица 2.**

Объемы ванадия и никеля в нефти месторождений Западной Сибири.

Месторождение	V	Ni	V/Ni
Алехинское	35	20	1,8
Лянторское	20	46	0,4
Красносельское	1	20	0,1
Трехозерное	1	20	0,1
Приразломное	10	65	0,2
Приобское	35	15	2,3
Петелинское	10	6	1,7
Самотлорское БВ <sub>8</sub> 39089	26	13	2
Самотлорское БВ <sub>7</sub> 30199	23	16	1,4
Самотлорское БВ <sub>7</sub> 39017	22	11	2
Самотлорское БВ <sub>7</sub> 39018	18	14	1,3

Чаще всего металлы концентрируются в тяжелых нефтях, высококипящих фракциях ( $T > 420^{\circ}\text{C}$ ), смолах и асфальтенах.

В Западной Сибири преобладают легкие и средние по плотности – 0,82-0,88 г/см<sup>3</sup> – нефти. Слабосернистые и сернистые – 0,8-1,8% с невысоким содержанием смол и асфальтенов, в основном 8 и 12% соответственно. Залежи тяжелых нефтей в регионе содержат сравнительно небольшие количества серы, смол и асфальтенов и лишь 30-35 г/т ванадия и 10-20 г/т никеля. В целом основная часть запасов нефти в регионе, сосредоточена в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре, где отсутствуют крупные скопления высокометаллоносных тяжелых нефтей и природных битумов.

Содержание ванадия и никеля (г/т) в некоторых нефтях Западной Сибири, согласно данным [9] приведено в **табл. 2**.

На среднем по запасам Жумажановском нефтяном месторождении слабосернистая и парафинистая нефть баженовской свиты объекта АС10 содержание ванадия в пробах нефти варьируется от 8 до 45 г/т, а среднее содержание составляет 24 г/т. Никеля содержится от 5 до 12 г/т, а среднее значение составляет 10 г/т. Нефть тюменской свиты объекта ЮС2/1 содержит от 9 до 26 г/т ванадия, среднее значение составляет 16 г/т и от 5 до 11 г/т никеля со средним значением 8 г/т.

**Выводы**

Учитывая глобальный энергопереход в средне- и долгосрочной перспективе потребление ванадия и никеля будет только расти, их извлечение из нефтей – важная задача, позволяющая решить следующие проблемные вопросы:

- Снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, поскольку при добыче открытым способом – разработке рудных карьеров, происходит значительная выемка пород и их перемещение. Нарушается цельность большой площади земного покрова. Так же, основная масса руд в естественном состоянии не пригодна для металлургического передела – объемы рудных полезных ископаемых по отношению к вмещающим их породам невелики. Например, доля редких металлов в пустой породе составляет менее 1%. Требуется создание отвалов, где в дальнейшем, будет происходить обогащение руды, то есть максимально возможное удаление пустой породы, что создаёт пылевое загрязнение. Однако, после обогащения содержание пустой породы всё равно остаётся высоким. В результате, при выплавке растёт количество шлака и повышается расход кокса и угля, тем самым снижая производительность доменных печей и увеличивая глобальный экологический ущерб;

- Деметаллизации нефти даст второй положительный экологический эффект – сокращение золы и коррозии высокотемпературных поверхностей на нефтеперерабатывающих заводах адгезионно- и коррозионно-активными неорганическими соединениями ванадия, которые образуются при стандартной термической обработке ванадийсодержащих нефтей;

- Дополнительное обеспечение промышленности ванадием и никелем за счет их извлечения из тяжелых, трудноизвлекаемых нефтей. Послужит на пользу независимости нашей МСБ (никель и ванадий обладают большим спросом в медицине, ВПК и т.д.);

- Получение дополнительной прибыли пользователями недр за счет извлечения попутных компонентов (ванадий и никель), содержащихся в тяжелых нефтях и битумах. Такая добыча РЗЭ привлекательна своей пассивностью: элементы сами идут к нам в руки;

- Более быстрая монетизация запасов ванадия и никеля, в случае их вовлечения в разработку как попутных компонентов в тяжелых нефтях. Добыча РЗЭ из средних по запасам нефтяных месторождений с содержанием ванадия в нефти менее 30 г/т будет экономически эффективна,

если добываемую нефть направлять на единый объект первичной нефтепереработки (кластер), что даст синергетический эффект, способный обеспечить дополнительную прибыль недропользователю. По данным USGS и Argus Media, Argus Non-Ferrous Markets в 2024 году цены на пентаоксид ванадия (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) с содержанием 98% в Китае, варьируются от 11,45 до 13,40 долларов США за килограмм [17]. В ближайшие несколько лет основным драйвером мирового рынка ванадия останется сталелитейная промышленность. **XXI**

#### Литература

1. Симонян Г.С. Эндогенное образование ванадиевых руд и нефтидов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 5 – С. 273-275;
2. Vanadium production volume worldwide by country | Statista. <https://www.statista.com/statistics/1312490/vanadium-production-volume-worldwide-by-country/>;
3. Top 4 Vanadium-producing Countries (Updated 2024) - Investing News Network. <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/vanadium-investing/vanadium-producing-countries/>;
4. Largo Physical Vanadium. <https://www.lpvanadium.com/dist/assets/docs/Project-Blue-2023-Vanadium-Report.pdf>;
5. Дейл С. «Статистический обзор мировой энергетики «Би-Пи» за 2022 год, семьдесят первое издание»: «Би-Пи» 2022 год;
6. Мировое производство никеля в 2023 году составило 242,8 тысяч тонн. <http://fcc.ru/article/mirovooe-proizvodstvo-nikelya-v-2023-godu-sostavilo-242-8-tysyach-tonn-102752>;
7. Пресс-релиз «НОРНИКЕЛЬ» объявляет итоги производственной деятельности за 2023 год <https://www.nornickel.ru>;
8. МЭА повысило оценку добычи нефти в мире в 2023 году. <https://nangs.org/news/upstream/mea-povysilo-otsenku-dobychi-nefti-v-2023-godu>;
9. Крикунов В.В., Шилов В.И. (ТО СургутНИПИнефть), Мосунов А.Ю. (ОАО СибИНКор) «Сравнительная физико-химическая характеристика нефтей пластов БВ7 и БВ8 Самотлорского месторождения», К, <http://www.oilnews.ru>;
10. Гейлен Д., Лайонс М., «Важные материалы для энергетического перехода: Редкоземельные элементы», 47 с, 2022 год, ISBN: 978-92-9260-437-0;
11. «Сводки о полезных ископаемых геологической службы США за 2022 год» – геологическая служба США: 202 с, ISBN 978-1-4113-4434-1;
12. «Обзор рынка Ванадия», [Электронный ресурс], <https://www.bushveldminerals.com>;
13. «Объём снабжения Ванадием сохраняется, при экспоненциальных прогнозах спроса» [Электронный ресурс] <https://www.miningreview.com>;
14. Отчёт конференции IMARC 2022: Австралиан Ванадиум Лимитед, 2022 год, [australianvanadium.com.au](http://australianvanadium.com.au);
15. Обзор мирового рынка ванадия и перспективы развития до 2033 г.. [https://chemguide.ru/research/vanadium\\_market\\_review.html](https://chemguide.ru/research/vanadium_market_review.html);
16. Лондонская биржа цветных металлов ЛМЕ/LME – цены. <https://metallcheckiy-portal.ru/index-cen-lme>;
17. «Vanadium in march» USGS Mineral Industry Surveys Désirée E. Polyak, Darlene V. Thompson.
18. The world nickel market in 2023 and 2024 – two years with surpluses – Stainless Steel World ([stainless-steel-world.net](http://stainless-steel-world.net))
19. <https://www.nsenenergybusiness.com/analysis/top-nickel-producing-companies/?cf-view>
20. Nickel metal still has key role to play in 2023 battery grade market: 2023 preview – Fastmarkets
21. <https://tradingeconomics.com/commodity/nickel>
22. Китай увеличил производство и экспорт нержавеющей стали – Новости металлургии – Металлоснабжение и сбыт ([metalinфо.ru](http://metalinфо.ru))

UDC: 553.982:665.613

**A.V. Fomkin**, Doctor of Engineering, 2JSC «Zarubezhneft», head of department of innovative development, [afomkin@nestro.ru](mailto:afomkin@nestro.ru)  
**A.D. Sergeev**, 1RSU of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin, [biturd8@gmail.com](mailto:biturd8@gmail.com)

## PROSPECTS OF EXTRACTION OF VANADIUM AND NICKEL FROM CRUDE OIL, ANALYSIS OF GLOBAL TRENDS

**Abstract:** The consumption rates of metals are increasing every year. The ongoing demand for fossil energy resources, along with environmental and climate issues, indicates that the economy requires cheap and accessible renewable energy sources to develop technological progress and transition to environmentally friendly technologies. These sources must address the challenges of accumulation and preservation.

A potential solution for replenishing the mineral resource base (MRB) with rare earth elements, alkaline, and transition metals could be their extraction as by-products obtained during oil production. The government of the Russian Federation is developing regulatory measures for licensing the extraction of minerals, metals, and other chemical elements and their compounds found in minerals that do not have a decisive impact on the industrial assessment of deposits but can be profitably extracted and utilized during the processing of primary minerals.

This work examines the potential of oil as a source of industrial volumes of rare earth metals and the possible economic viability of their extraction.

**Keywords:** associated components, vanadium, nickel, crude oil, rare earth elements, mineral resources base.