

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕНИЯ В ОТЛОЖЕНИЯХ  
ВОЛЖСКОГО СЛАНЦЕВОГО БАСЕЙНА  
РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫМ МЕТОДОМ  
С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ  
КОНЦЕНТРИРОВАНИЕМ**

**Р.И. Шакуров<sup>1</sup>**  
**В.В. Кузнецов<sup>1,2</sup>**  
**Е.А. Филатова<sup>1</sup>**  
**Ю.М. Аверина<sup>1</sup>**  
**В.С. Болдырев<sup>3</sup>**

ryslan-92@bk.ru  
vitkuzn1@mail.ru  
filatova1604@mail.ru  
averinajm@mail.ru  
boldyrev.v.s@bmstu.ru

<sup>1</sup> РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ИФХЭ РАН, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

**Аннотация**

Сланцы Коцюбинского месторождения Волжского бассейна перспективны как альтернативный источник редкого и стратегически важного металла — рения. Для оценки целесообразности их переработки необходимы данные о количественном содержании рения, что требует разработки относительно быстрого и надежного метода анализа. Определение рения проведено рентгенофлуоресцентным методом с предварительным электрохимическим концентрированием металла его осаждением на катоде после предварительного вскрытия пробы. Применение рентгенофлуоресцентного анализа позволяет определить рений на фоне десятикратного избытка молибдена и других металлов. Содержание рения в глинистых сланцах составило  $0,68 \pm 0,20$  г/т, что делает экономически оправданной их переработку. В черных сланцах рений не обнаружен. Результаты анализа рентгенофлуоресцентным методом с предварительным электрохимическим концентрированием сопоставимы с полученными методом ИСП МС. В то же время анализ методом ЛА ИСП МС приводит к заниженным результатам по содержанию рения, что, по-видимому, связано с его тугоплавкостью. Сравнивая два метода, приводящих к достоверным результатам (ИСП МС и электрохимическое концентрирование + рентге-

**Ключевые слова**

*Рений, сланцы, отложения, электрохимическое концентрирование, рентгенофлуоресцентный метод*

нофлуоресцентный анализ), можно отметить, что Поступила 26.04.2024  
предлагаемый метод не требует дорогостоящего Принята 20.11.2024  
оборудования и реализуем в полевых условиях © Автор(ы), 2025

---

*Работа выполнена в рамках госзадания (проект  
№ FSN-2025-0013 (0705-2025-0013))*

**Введение.** В настоящее время в Российской Федерации добывается порядка 2,5 т/год рения [1], в то время как годовая потребность в нем оценивается как 5 т/год; годовой дефицит рения составляет примерно 2,5...3,0 т [2]. В настоящее время покрытие возникающего дефицита за счет внешних поставок затруднено, что заставляет искать собственные источники рения и разрабатывать технологии его извлечения.

Ввиду тугоплавкости, прочности и высокой химической инертности рений незаменим в авиастроении [3]. Кроме того, ренийсодержащие катализаторы эффективны в процессах нефтепереработки [4] и органическом синтезе для проведения гомогенного и гетерогенного гидрирования [5–7]. Возрастающий спрос на рений и содержащие его соединения материалы требует разработки быстрых, надежных и чувствительных методов его определения.

Минерал рениит, близкий по составу к дисульфиду рения  $\text{ReS}_2$ , содержится в fumarольных полях вулкана Кудрявый, находящегося на о. Итуруп и входящего в состав Южнокурильской гряды. Динамические запасы рения в fumarольных газах оцениваются в 36 т/год, однако технология его извлечения до сих пор до конца не разработана [8, 9], при этом высокое содержание рения в рениите делает его переработку в целях извлечения рения экономически целесообразной [9]. Для определения содержания рения в fumarолах вулкана традиционно используется трудоемкий и дорогостоящий метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП МС), использование которого в полевых условиях затруднительно. Для определения рения в рениите возможно использование рентгенофлуоресцентного анализа с предварительным концентрированием рения электроосаждением на катоде [10].

Кроме рениита, интерес представляет извлечение рения из других источников, в которых его содержание ниже, в частности, из сланцевых отложений Волжского бассейна [11, 12], содержание рения в которых колеблется в широких пределах (0,013...0,22 г/т). Минимальная концентрация, при которой переработка сланцев оказывается экономически оправданной, составляет 0,05 г/т [12]. Разработка методов определения рения в сланцевых породах является актуальной задачей.

Сложная матрица, в которой находится рений в сланцах, и его относительно невысокое содержание в них ограничивают перечень аналитических методов. Использование лазерной абляции, совмещенной с масс-спектрометрическим определением рения (ЛА ИСП МС), не требует предварительного разложения сложной по составу пробы [13, 14]. Однако существенной проблемой, препятствующей широкому распространению ЛА ИСП МС, является отсутствие стандартных образцов в виде соответствующей сертифицированной микрогомогенной матрицы. Традиционно использующийся метод ИСП МС требует длительного переведения определяемых элементов в растворимую форму, при этом сложный состав матрицы затрудняет количественное определение рения. Рентгенофлуоресцентный метод определения металлов, в частности рения [15–17], обладает высокой селективностью, а электроосаждение позволяет эффективно сконцентрировать определяемые элементы в твердой матрице [18].

*Цель работы* — установление возможности определения рения в сланцевых породах Волжского бассейна рентгенофлуоресцентным методом с предварительным электрохимическим концентрированием, определение метрологических характеристик метода и сопоставление полученных данных с результатами ИСП МС и ЛА ИСП МС.

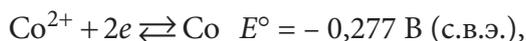
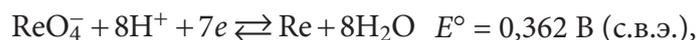
**Материалы и методы исследования.** Для анализа взяты сланцы Коцюбинского месторождения, представляющие собой глинистые (серия образцов № 1) и черные (серия образцов № 2) сланцы. Фазовый состав образцов исследован методом рентгеновской дифракции на приборе *Bruker D8 ADVANCE* с геометрией Брэгга — Brentano, оснащенном детектором с дисперсией по энергиям LYNXEYE XE. В экспериментах по рентгеновской дифракции использовано  $\text{CuK}\alpha$ -излучение ( $\lambda = 0,154051$  нм), разделения компонентов дублета  $K_{\alpha 1}$  и  $K_{\alpha 2}$  не проведено. Уточнение кристаллической структуры выполнено методом Ритвельда с использованием ПО *JANA2006*.

Для разложения пробы и перевода соединений рения в раствор навеску примерно 0,1 г измельчали в агатовой ступке, обрабатывали смесью концентрированных азотной (ос. ч., 67 % (об.)) и хлорной (ос. ч., 70 % (об.)) кислот, взятых в объемном соотношении 1 : 3. Объем смеси кислот, использовавшийся для разложения образцов сланцев, равен примерно 75 мл. После добавления смеси кислот пробу нагревали до кипения и кипятили в течение 1 ч. Затем в анализируемую пробу добавляли 10 мл фтороводородной кислоты (ос. ч., 50 % (об.)) для разложения силикатной части породы, после чего раствор кипятили еще 15 мин для удаления  $\text{SiF}_4$  из анализи-

руемого раствора. После охлаждения избыток кислот нейтрализован декарбонизированным раствором гидроксида натрия до pH = 6,0.

Для осуществления процесса «индуцированного» соосаждения рения и молибдена в сплав с кобальтом в полученный раствор вводили 20 ммоль сульфата кобальта(II) и 20 ммоль цитрата натрия [19, 20]. После этого раствор в мерной колбе доводили до объема 100 мл.

Электрохимическое катодное концентрирование рения в сплав с кобальтом проводили в ячейке без разделения катодного и анодного пространств ( $V = 100 \text{ см}^3$ ) в гальваностатическом режиме при плотности тока  $0,075 \text{ А/см}^2$  в течение 30 мин. В качестве катода использовали предварительно подготовленный медный образец прямоугольной формы с  $S = 4 \text{ см}^2$ , анодом служила сетка платинированного титана. Для интенсификации массопереноса раствор перемешивали с помощью магнитной мешалки. Стандартные потенциалы полуреакций с участием ионов кобальта и рения составляют соответственно ( $t = 25 \text{ °C}$ )<sup>1</sup>:

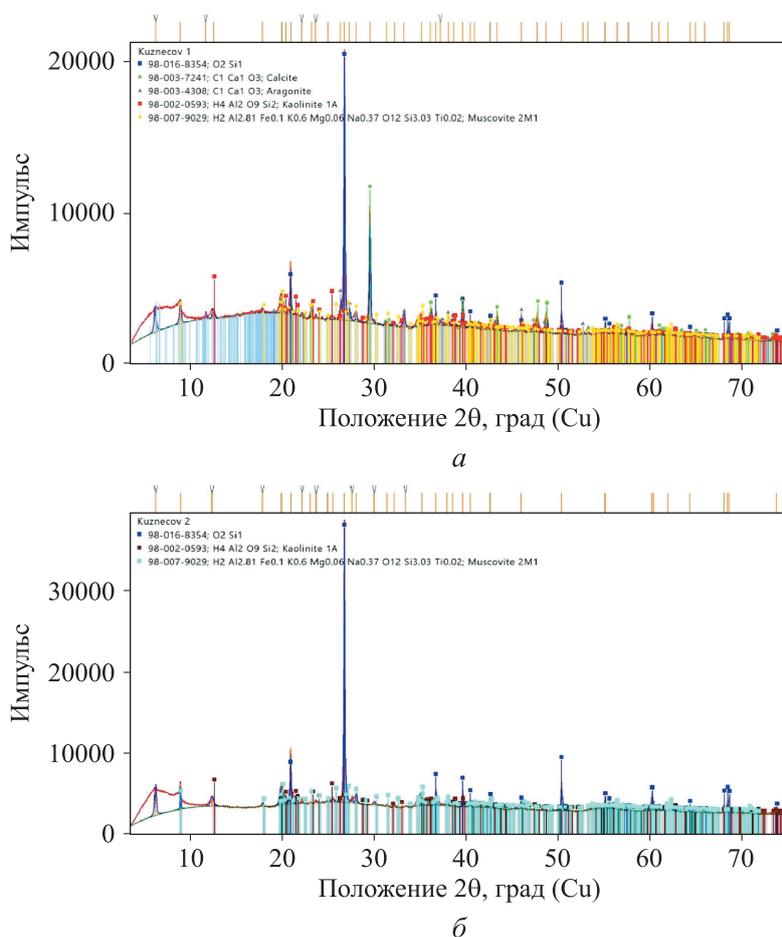


Осаждение рения на катоде термодинамически более предпочтительно по сравнению с кобальтом. В результате, как показано в [10], за 30 мин электролиза из раствора извлекается практически весь рений.

Полученные катодные осадки промывали дистиллированной водой и сушили на воздухе. Электрохимическое осаждение рения в твердую фазу позволяло достичь высоких коэффициентов концентрирования. Полученные электролизом осадки анализировали методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФЛА) с использованием волнового спектрометра *AXIOS Advanced* (PANalytical B.V., Нидерланды). Прибор оснащен рентгеновской трубкой с Rh-анодом мощностью 4 кВт и кристаллом-анализатором (LIF-220). Рабочая камера прибора вакуумировалась. Определение содержания рения проводили по площади его резонансной линии  $\text{ReL}\alpha$ . Для обработки калибровочных зависимостей площади пика от содержания рения в анализируемом растворе использовали метод наименьших квадратов.

**Результаты и их обсуждение.** Рентгеновские дифрактограммы образцов глинистых и черных сланцев Коцюбинского месторождения приведены на рис. 1.

<sup>1</sup> Сухотин А.М., ред. Справочник по электрохимии. Л., Химия, 1981.



**Рис. 1.** Дифрактограммы глинистых (а) и черных (б) сланцев Коцюбинского месторождения ( $\text{CuK}\alpha$ -излучение)

Оба представленных образца — минералы на основе кварца ( $\alpha$ - $\text{SiO}_2$ , JCPDS 98–016–8354). В связи с этим для вскрытия образцов применена обработка раствором фтористоводородной кислоты, отсутствовавшая при анализе проб вулкана Кудрявый. В состав указанных пород входят каолинит (глина) и мусковиты сложного состава, такого как  $\text{KAl}_2[\text{Al}, \text{Si}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ,  $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,4}(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_{2-3}[\text{Al}, \text{Si}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ . Сложный элементный состав мусковитов требует необходимой избирательности предлагаемого метода анализа, что решено рентгенофлуоресцентным методом.

Кроме перечисленных выше фаз, образец глинистых сланцев дополнительно содержит фазы кальцита и арагонита, представляющие собой модификации карбоната кальция. Их вскрытие не представляет труда ввиду их хорошей растворимости в кислотах. Таким образом, можно

предположить, что предложенная методика пробоподготовки позволит обеспечить полное переведение рения в анализируемый раствор.

Электрохимическое концентрирование рения в твердую фазу, осуществляемое электроосаждением, позволяет достичь высокой степени концентрирования. На РФЛА-спектрах пики рения наблюдаются при  $2\theta = 60,5^\circ$  ( $\text{ReL}\alpha$ ) и  $2\theta = 51,5^\circ$  ( $\text{ReL}\beta_1$ ) (рис. 2).

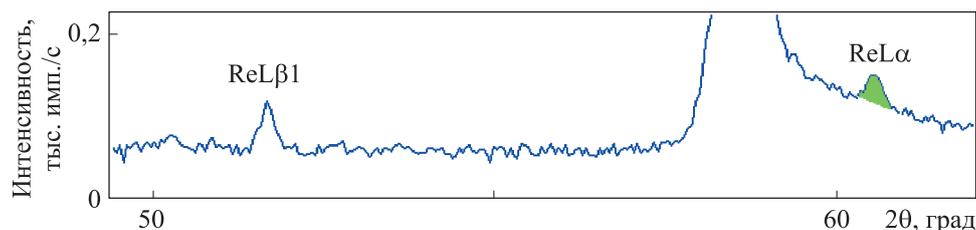


Рис. 2. Линии  $\text{ReL}\alpha$  и  $\text{ReL}\beta_1$  на РФЛА-спектре

Важно, что пики рения не перекрываются пиками других элементов. В сланцах Коцюбинского месторождения рению всегда сопутствует молибден, содержание которого в несколько раз больше содержания рения. Линия молибдена  $\text{MoK}\alpha$  на РФЛА-спектрах наблюдается при  $2\theta = 28,6^\circ$  (рис. 3) и не мешает определению рения. Таким образом, предлагаемый метод позволяет проводить раздельное определение рения и молибдена в исследуемых сланцах.

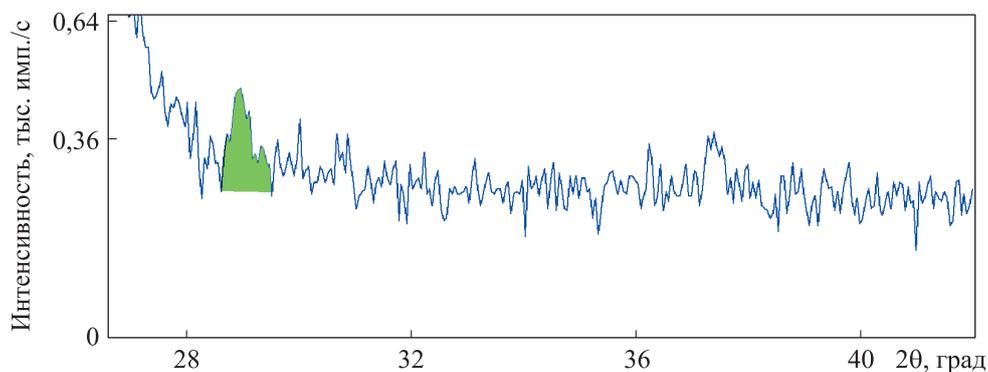


Рис. 3. Линия  $\text{MoK}\alpha$  на РФЛА-спектре

В качестве аналитического сигнала, пропорционального содержанию рения в анализируемом образце, выбрана площадь под линией  $\text{ReL}\alpha$  за вычетом фонового сигнала. Прямо пропорциональная зависимость содержания перренат-ионов в растворе, из которого происходит электроосаждение рения, от площади пика  $\text{ReL}\alpha$  в интервале содержаний рения

5...200 мкг/мл показана в [10]. Для количественного определения рения применены методы градуировочного графика и добавок.

Рений обнаружен только в глинистых сланцах Коцюбинского месторождения. Среднее содержание рения в них составило  $0,68 \pm 0,20$  г/т, что делает переработку глинистых сланцев экономически оправданной. Всего проанализировано 50 образцов. Полученный результат соответствовал определенному методом ИСП МС ( $0,59 \pm 0,15$  г/т). Следует отметить, что метод ИСП МС едва ли может быть применен в полевых условиях для анализа образцов сланцев, что позволил сделать разработанный метод. В то же время анализ методом ЛА ИСП МС приводил к заниженным результатам, определенное им содержание рения составило менее 0,02 г/т.

Во всех пробах глинистых сланцев рению сопутствовал молибден, причем отношение площадей под резонансными линиями  $\text{MoK}\alpha$  и  $\text{ReL}\alpha$  находилось в пределах 6–10. Приблизительно десятикратное преобладание молибдена характерно для сланцев Коцюбинского месторождения. Кроме молибдена, в анализируемых образцах методами ИСП МС и ЛА ИСП МС обнаружены кальций, магний, железо, цинк, марганец, медь и хром. Отметим, что возможное соосаждение железа, цинка, меди, марганца и хрома на катоде не влияет на избирательность определения молибдена и рения рентгенофлуоресцентным методом РФЛА. В черных сланцах Коцюбинского месторождения рений обнаружен не был.

**Заключение.** Можно сделать вывод о применимости метода РФЛА с электрохимическим концентрированием для определения содержания рения в сланцах Коцюбинского месторождения. Полученные данные коррелируют с результатами применения метода ИСП МС ( $0,59 \pm 0,15$  г/т). В то же время метод ЛА ИСП МС приводит к заниженным результатам ( $< 0,02$  г/т), что, по-видимому, связано с тугоплавкостью рения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Спорыхина Л.В., Быховский Л.З., Чернова А.Д. Сырьевая база рассеянных элементов России: состояние и использование. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*, 2020, № 2, с. 23–34. EDN: BZCFFX
- [2] Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития. *Геология рудных месторождений*, 2016, т. 58, № 2, с. 97–119. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0016777016020027>
- [3] Rahman M., Davey K., Qiao Sh.-Zh. Advent of 2D rhenium disulfide ( $\text{ReS}_2$ ): fundamentals to applications. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, vol. 27, no. 10, art. 1606129. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.201606129>

- [4] Biloen P., Helle J.N., Verbeek H., et al. The role of rhenium and sulfur in platinum-based hydrocarbon-conversion catalysts. *J. Catal.*, 1980, vol. 63, no. 1, pp. 112–118. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(80\)90064-0](https://doi.org/10.1016/0021-9517(80)90064-0)
- [5] Gothe M.L., Silva K.L.C., Adolfo L., et al. Rhenium — a tuneable player in tailored hydrogenation catalysis. *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2021, vol. 2021, no. 39, pp. 4043–4065. DOI: <https://doi.org/10.1002/ejic.202100459>
- [6] Broadbent H.S., Bartley W.J. Rhenium catalysts. VII. Rhenium (VI) oxide. *J. Org. Chem.*, 1963, vol. 28, no. 9, pp. 2345–2347.
- [7] Kessler V.G., Seisenbaeva G.A. Rhenium nanochemistry for catalyst preparation. *Minerals*, 2012, vol. 2, iss. 3, pp. 244–257. DOI: <https://doi.org/10.3390/min2030244>
- [8] Korzhinsky M., Tkachenko S., Shmulovich K., et al. Native AI and Si formation. *Nature*, 1995, vol. 375, art. 544. DOI: <https://doi.org/10.1038/375544a0>
- [9] Балихин А.В., Барковская О.Э. Перспективы извлечения рения из вулканических газов. Обзор. *Комплексное использование минерального сырья*, 2017, № 3, с. 16–23. EDN: YYAEKT
- [10] Шакуров Р.И., Кузнецов В.В., Филатова Е.А. и др. Определение рения в вулканических породах методом рентгенофлуоресцентного анализа с предварительным электрохимическим концентрированием. *Цветные металлы*, 2021, № 10, с. 43–49. DOI: <https://doi.org/110.17580/tsm.2021.10.06>
- [11] Самойлов А.Г., Енгальчев С.Ю., Зозыряев Н.Ю. и др. Ренийность верхнеюрских горючих сланцев центральной части Волжского сланцевого бассейна. *Региональная геология и металлогения*, 2018, № 75, с. 67–77.
- [12] Самойлов А.Г., Зозырев Н.Ю., Енгальчев С.Ю. и др. Рений в отложениях волжского яруса центральной части Волжского сланцевого бассейна. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Науки о Земле*, 2017, т. 17, № 1, с. 58–61. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2017-17-1-58-61>
- [13] Malinovsky D., Rodushkin I., Axelsson M.D., et al. Determination of rhenium and osmium concentrations in molybdenite using laser ablation double focusing sector field ICP-MS. *J. Geochem. Explor.*, 2004, vol. 81, iss. 1-3, pp. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2003.08.003>
- [14] Mank A.J.G., Mason P.R.D. A critical assessment of laser ablation ICP-MS as an analytical tool for depth analysis in silica-based glass samples. *J. Anal. At. Spectrom.*, 1999, vol. 14, iss. 8, pp. 1143–1153. DOI: <https://doi.org/10.1039/A903304A>
- [15] Solt M.W., Wahlberg J.S., Myers A.T. Determination of rhenium in molybdenite by X-ray fluorescence: a combined chemical-spectrometric technique. *Talanta*, 1969, vol. 16, iss. 1, pp. 37–43. DOI: [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(69\)80238-9](https://doi.org/10.1016/0039-9140(69)80238-9)
- [16] Peddy R.V.C., Gopalakrishnan K., Koshy V.J., et al. Determination of the platinum, rhenium and chlorine contents of alumina-based catalysts by X-ray fluorescence spectrometry. *Analyst*, 1991, vol. 116, iss. 8, pp. 847–850. DOI: <https://doi.org/10.1039/AN9911600847>

- [17] Kolpakova N.A., Buinovskii A.S., Mel'nikova I.A. Determination of rhenium in gold-containing ores by X-ray fluorescence spectrometry. *J. Anal. Chem.*, 2009, vol. 64, no. 2, pp. 144–148. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061934809020099>
- [18] Zawisza B., Sitko R. Determination of Te, Bi, Ni, Sb and Au by X-ray fluorescence spectrometry following electroenrichment on a copper cathode. *Spectrochimica Acta B*, 2007, vol. 62, iss. 10, pp. 1147–1152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.07.004>
- [19] Kuznetsov V.V., Gamburg Yu.D., Zhulikov V.V., et al. Electrodeposited NiMo, CoMo, ReNi, and electroless NiReP alloys as cathode materials for hydrogen evolution reaction. *Electrochimica Acta*, 2020, vol. 354, art. 136610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136610>
- [20] Елисеева Е.А., Березина С.Л., Болдырев В.С. и др. Влияние морфологии частиц  $\text{Co}_2\text{O}_3$  на кинетику растворения в электролитах. *Цветные металлы*, 2020, № 11, с. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.11.02>

**Шакуров Руслан Ильдарович** — стажер кафедры общей и неорганической химии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

**Кузнецов Виталий Владимирович** — д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры общей и неорганической химии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9); главный научный сотрудник ИФХЭ РАН (Российская Федерация, 119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корп. 4).

**Филатова Елена Алексеевна** — канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры аналитической химии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

**Аверина Юлия Михайловна** — канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

**Болдырев Вениамин Станиславович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Шакуров Р.И., Кузнецов В.В., Филатова Е.А. и др. Определение рения в отложениях Волжского сланцевого бассейна рентгенофлуоресцентным методом с предварительным электрохимическим концентрированием. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 6 (123), с. 120–132. EDN: ZENRKE

## DETERMINATION OF RHENIUM IN SEDIMENTS OF THE VOLGA SHALE BASIN BY THE X-RAY METHOD WITH PRELIMINARY ELECTROCHEMICAL CONCENTRATION

R.I. Shakurov<sup>1</sup>

V.V. Kuznetsov<sup>1,2</sup>

E.A. Filatova<sup>1</sup>

Yu.M. Averina<sup>1</sup>

V.S. Boldyrev<sup>3</sup>

ryslan-92@bk.ru

vitkuzn1@mail.ru

filatova1604@mail.ru

averinajm@mail.ru

boldyrev.v.s@bmstu.ru

<sup>1</sup>Mendeleev University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>IPCE RAS, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>BMSTU, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The shales of the Kotsyubinsky deposit in the Volga basin are promising as an alternative source of a rare and strategically important metal — rhenium. To assess the feasibility of their processing, data on the quantitative content of rhenium is required, which requires the development of a relatively fast and reliable analysis method. In the article, the determination of rhenium is carried out by the X-ray fluorescence method with preliminary electrochemical concentration of the metal by its deposition on the cathode after preliminary opening of the sample. The use of X-ray fluorescence analysis makes it possible to determine rhenium against the background of a tenfold excess of molybdenum and other metals. The rhenium content in clay shales was found to be 0.68–0.20 g/t, which makes their processing economically justified. Rhenium was not found in black shales. The results of analysis using the X-ray fluorescence method with preliminary electrochemical concentration are comparable to those obtained by the ICP-MS method. At the same time, analysis by the ICP-OES method leads to underestimated results on the rhenium content, which is apparently due to its refractoriness. Comparing two methods that lead to reliable results (ICP-MS and electrochemical concentration + X-ray fluorescence analysis), it can be noted that the proposed method does not require expensive equipment and can be implemented in the field

### Keywords

*Rhenium, schists, determination, electrochemical preconcentration, X-ray fluorescence analysis*

Received 26.04.2024

Accepted 20.11.2024

© Author(s), 2025

---

*The work was carried out within the framework of the State Assignment (project no. FSFN-2025-0013 (0705-2025-0013))*

## REFERENCES

- [1] Sporykhina L.V., Bykhovskiy L.Z., Chernova A.D. The state and usage of Russian mineral resource base of scattered elements. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Recourses of Russia. Economics and Management], 2020, no. 2, pp. 23–34 (in Russ.). EDN: BZCFFX
- [2] Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., et al. Mineral resources of high-tech metals in Russia: state of the art and outlook. *Geol. Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 83–103. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1075701516020021>
- [3] Rahman M., Davey K., Qiao Sh.-Zh. Advent of 2D rhenium disulfide (ReS<sub>2</sub>): fundamentals to applications. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, vol. 27, no. 10, art. 1606129. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.201606129>
- [4] Biloen P., Helle J.N., Verbeek H., et al. The role of rhenium and sulfur in platinum-based hydrocarbon-conversion catalysts. *J. Catal.*, 1980, vol. 63, no. 1, pp. 112–118. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(80\)90064-0](https://doi.org/10.1016/0021-9517(80)90064-0)
- [5] Gothe M.L., Silva K.L.C., Adolfo L., et al. Rhenium — a tuneable player in tailored hydrogenation catalysis. *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2021, vol. 2021, no. 39, pp. 4043–4065. DOI: <https://doi.org/10.1002/ejic.202100459>
- [6] Broadbent H.S., Bartley W.J. Rhenium catalysts. VII. Rhenium (VI) oxide. *J. Org. Chem.*, 1963, vol. 28, no. 9, pp. 2345–2347.
- [7] Kessler V.G., Seisenbaeva G.A. Rhenium nanochemistry for catalyst preparation. *Minerals*, 2012, vol. 2, iss. 3, pp. 244–257. DOI: <https://doi.org/10.3390/min2030244>
- [8] Korzhinsky M., Tkachenko S., Shmulovich K., et al. Native AI and Si formation. *Nature*, 1995, vol. 375, art. 544. DOI: <https://doi.org/10.1038/375544a0>
- [9] Balikhin A.V., Barkovskaya O.E. Perspectives of rhenium recovery from volcanic gases. review. *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syrya* [Complex Use of Mineral Resources], 2017, no. 3, pp. 16–23 (in Russ.). EDN: YYAEKT
- [10] Shakurov R.I., Kuznetsov V.V., Filatova E.A., et al. Determination of rhenium in igneous rock by X-ray fluorescence spectrometry with prior electrochemical concentration. *Tsvetnye metally*, 2021, no. 10, pp. 43–49 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/110.17580/tsm.2021.10.06>
- [11] Samoylov A.G., Engalychev S.Yu., Zozyryaev N.Yu., et al. Rhenium potential of the Upper Jurassic oil shale in the central part of the Volga Shale basin. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny], 2018, no. 75, pp. 67–77 (in Russ.).
- [12] Samoylov A.G., Zozyrev N.Yu., Engalychev S.Yu., et al. Rhenium in the Volzhsky stage deposits of the Volga Shale basin central part. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Ser. Nauki o Zemle* [Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences], 2017, vol. 17, no. 1, pp. 58–61 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2017-17-1-58-61>

[13] Malinovsky D., Rodushkin I., Axelsson M.D., et al. Determination of rhenium and osmium concentrations in molybdenite using laser ablation double focusing sector field ICP-MS. *J. Geochem. Explor.*, 2004, vol. 81, iss. 1-3, pp. 71–79.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2003.08.003>

[14] Mank A.J.G., Mason P.R.D. A critical assessment of laser ablation ICP-MS as an analytical tool for depth analysis in silica-based glass samples. *J. Anal. At. Spectrom.*, 1999, vol. 14, iss. 8, pp. 1143–1153. DOI: <https://doi.org/10.1039/A903304A>

[15] Solt M.W., Wahlberg J.S., Myers A.T. Determination of rhenium in molybdenite by X-ray fluorescence: a combined chemical-spectrometric technique. *Talanta*, 1969, vol. 16, iss. 1, pp. 37–43. DOI: [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(69\)80238-9](https://doi.org/10.1016/0039-9140(69)80238-9)

[16] Peddy R.V.C., Gopalakrishnan K., Koshy V.J., et al. Determination of the platinum, rhenium and chlorine contents of alumina-based catalysts by X-ray fluorescence spectrometry. *Analyst*, 1991, vol. 116, iss. 8, pp. 847–850.

DOI: <https://doi.org/10.1039/AN9911600847>

[17] Kolpakova N.A., Buinovskii A.S., Mel'nikova I.A. Determination of rhenium in gold-containing ores by X-ray fluorescence spectrometry. *J. Anal. Chem.*, 2009, vol. 64, no. 2, pp. 144–148. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061934809020099>

[18] Zawisza B., Sitko R. Determination of Te, Bi, Ni, Sb and Au by X-ray fluorescence spectrometry following electroenrichment on a copper cathode. *Spectrochimica Acta B*, 2007, vol. 62, iss. 10, pp. 1147–1152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.07.004>

[19] Kuznetsov V.V., Gamburg Yu.D., Zhulikov V.V., et al. Electrodeposited NiMo, CoMo, ReNi, and electroless NiReP alloys as cathode materials for hydrogen evolution reaction. *Electrochimica Acta*, 2020, vol. 354, art. 136610.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136610>

[20] Eliseeva E.A., Berezina S.L., Boldyrev V.S., et al. Influence of the morphology of Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles on the dissolution kinetics in electrolytes. *Tsvetnye metally*, 2020, no. 11, pp. 14–18 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.11.02>

**Shakurov R.I.** — Trainee, Department of General and Inorganic Chemistry, Mendeleev University (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

**Kuznetsov V.V.** — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Department of General and Inorganic Chemistry, Mendeleev University (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation); Chief Researcher, IPCE RAS (Leninskiy prospekt 31, korp. 4, Moscow, 119071 Russian Federation).

**Filatova E.A.** — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Analytical Chemistry, Mendeleev University (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

**Averina Yu.M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Department of Logistics and Economic Informatics, Mendeleev University (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

**Boldyrev V.S.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Shakurov R.I., Kuznetsov V.V., Filatova E.A., et al. Determination of rhenium in sediments of the Volga Shale basin by the X-ray method with preliminary electrochemical concentration. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 6 (123), pp. 120–132 (in Russ.). EDN: ZEHRKE