

УДК 553.411 (571.61)

**В.Е. Кунгурова, Ю.П. Трухин, В.А. Степанов**

**ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СЕРЫ СУЛЬФИДОВ  
НИКЕЛЕНОСНЫХ ИНТРУЗИЙ КАМЧАТСКОЙ  
НИКЕЛЕНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ**

Определен изотопный состав серы  $\delta^{34}\text{S}$  в мономинеральных пробах сульфидов, отобранных из различных типов руд и минерализованных пород Камчатской никеленосной провинции (КНП). По изотопному составу серы выделены две группы: пробы месторождения Шануч, характеризующиеся повышенным содержанием тяжелого изотопа ( $\delta^{34}\text{S} +2,0 - +2,7 \text{‰}$ ), и обогащенные легким изотопом серы пробы Кувалорогского рудного поля,  $\delta^{34}\text{S}$  которых колеблется в пределах  $-0,1 - -1,9 \text{‰}$ . В целом, для серы сульфидов характерен узкий разброс изотопных отношений и эта величина близка к сере метеоритной.

Ключевые слова: Камчатская никеленосная провинция (КНП), изотопный состав серы, мафит-ультрамафитовые интрузии, медно-никелевая минерализация.

---

**В** качестве важнейших элементов-индикаторов наличия в интрузиях медно-никелевого оруденения отмечается сера. Так, эмпирическим критерием отличия безрудных и непромышленных сульфидоносных интрузий от интрузий с промышленным Pt-Cu-Ni оруденением в норильских месторождениях являются низкие содержания серы (соответственно 0,003–0,006 % и 0,2–0,3 % в первой группе) и обогащение серой (до 1–2 %) второй группы пород [1]. При этом в безрудных интрузиях значения  $\delta^{34}\text{S}$  близки к метеоритному изотопному составу и обычно изменяются от 0 до +4,5 ‰. Малорудные интрузии более существенно обогащены  $\delta^{34}\text{S}$  (+6,0 – +8,4 ‰) и обнаруживают зависимость от литологии вмещающих толщ и, как следствие, низкую степень гомогенизации серы. В промышленно-рудноносных интрузиях средние значения  $\delta^{34}\text{S}$  максимальны – 9–11 ‰ и более гомогенны [1].

Отмечено, что несмотря на широкий (до 35‰) в целом диапазон вариаций изотопных отношений серы, основная масса их в мафит-ультрамафитовых интрузиях группируется около нулевого значения, что, независимо от их местонахождения,

возраста и геологической обстановки однозначно свидетельствует о преимущественно мантийном источнике их серы [2]. Однако, экспериментально установленная в последние годы низкая растворимость S в мафит-ультрамафитовых расплавах ставит под сомнение возможность накопления сульфидов в значительных количествах без привлечения либо дополнительных источников S, либо процессов перераспределения мантийной S в верхних горизонтах коры [3, 4]. Вопрос об определении источников металлов и серы в рудообразовании остается актуальным.

Был определен изотопный состав серы  $\delta^{34}\text{S}$  в 38 мономинеральных пробах сульфидных минералов (масс-спектрометр Finnigan-Mat-252 в ДВГИ ДВО РАН, аналитик Т.А. Веливецкая; табл. 1), отобранных из массивных, брекчиевидных, прожилково-вкрапленных руд и минерализованных пород северной зоны КНП (месторождение Шануч, рудное тело 1, [5, 6]) и южной (проявления Тундровое, Аннабергитовая Шель, Нижнемедвежье, Верхнемедвежье, Олень, Рассоха [7, 8, 9]), пород краевых частей Кувалорогской интрузии, содержащих сульфидную минерализацию.

Как видно из рис. 1, табл. 1 изученные образцы сульфидных медно-никелевых руд по  $\delta^{34}\text{S}$  отчетливо разделяются на две генетические группы: пробы с месторождения Шануч, существенно отличающиеся повышенным содержанием тяжелого изотопа (табл. 1) и несколько обогащенные легким изотопом сульфиды из проявлений массива Кувалорог,  $\delta^{34}\text{S}$  которых колеблется в незначительных пределах.

Таблица 1

**Изотопный состав серы сульфидов**

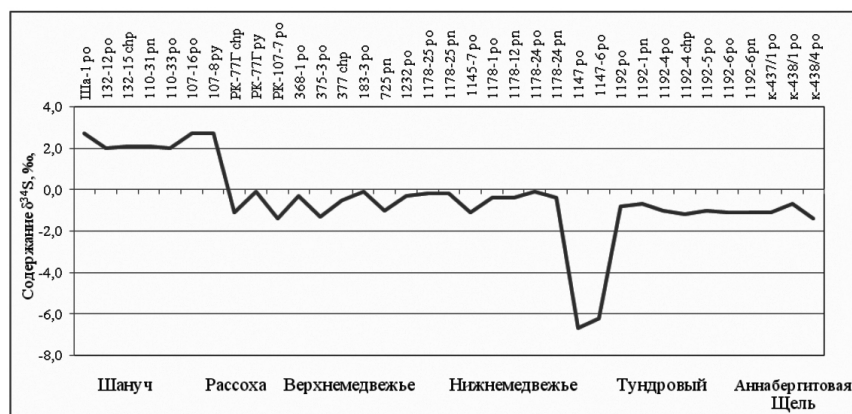
| Месторождение, рудопроявление  | Материал, из которого отобраны сульфиды | Номер образца | $\delta^{34}\text{S}$ , ‰ |
|--|---|---------------|---------------------------|
| <i>Различные типы руд в ортопироксенитах, алопироксенитовых, апотальцитовых амфиболитах, биотит-амфиболовых меладiorитах</i> |   |               |                           |
| Шануч  | массивная руда                          | Ша-1 ро       | +2,7                      |
|  | массивная руда                          | 132-12 ро     | +2,0                      |
|  | массивная руда                          | 132-15 chp    | +2,1                      |
|  | брекчиевидная руда                      | 110-31 pn     | +2,1                      |
|  | брекчиевидная руда                      | 110-33 ро     | +2,0                      |

Продолжение табл. 1

| Месторождение, рудопроявление   | Материал, из которого отобраны сульфиды      | Номер образца | $d^{34}\text{S}$ , ‰ |
|---|--|---------------|----------------------|
|   | прожилково-вкрапленная руда                  | 107-16 ро     | +2,7                 |
|   | прожилково-вкрапленная руда                  | 107-8 ру      | +2,7                 |
| <i>Окисленная руда с вкрапленностью сульфидов в ортопироксенитах</i>  |  |               |                      |
| Рассоха   | окисленная густовкрапленная руда             | РК-77Г chp    | -1,1                 |
|   | окисленная густовкрапленная руда             | РК-77Г ру     | -0,1                 |
|   | окисленная вкрапленная руда                  | РК-107-7 ро   | -1,4                 |
| <i>Оливинсодержащие плагиоклаз-флогопит-амфиболовые пироксениты с гнездами и крупными вкрапленниками сульфидов</i>            |  |               |                      |
| Верхнемедвежье  | вкрапленная руда                             | 368-1 ро      | -0,3                 |
|   | вкрапленная руда                             | 375-3 ро      | -1,3                 |
|   | вкрапленная руда                             | 377 chp       | -0,5                 |
|   | вкрапленная руда                             | 183-3 ро      | -0,1                 |
|   | вкрапленная руда                             | 725 pn        | -1,0                 |
|   | вкрапленная руда                             | 1232 ро       | -0,3                 |
| <i>Вкрапленные руды в флогопитовых горнблендитах (1178-25); оливинсодержащих плагиоклаз-флогопит-амфиболовых пироксенитах</i> |  |               |                      |
| Нижнемедвежье   | пятнисто-вкрапленная руда                    | 1178-25 ро    | -0,2                 |
|   | пятнисто-вкрапленная руда                    | 1178-25 pn    | -0,2                 |
|   | прожилково-вкрапленная руда                  | 1145-7 ро     | -1,1                 |
|   | вкрапленная руда                             | 1178-1 ро     | -0,4                 |
|   | вкрапленная руда                             | 1178-12 pn    | -0,4                 |
|   | вкрапленная руда                             | 1178-24 ро    | -0,1                 |
|   | вкрапленная руда                             | 1178-24 pn    | -0,4                 |
|   | густовкрапленная руда (на контакте интрузии) | 1147 ро       | -6,7                 |
| густовкрапленная руда (на контакте интрузии)  | 1147-6 ро                                    | -6,2          |                      |
| <i>Окисленная руда с густой вкрапленностью сульфидов в пироксенитах</i>   |  |               |                      |
| Тундровый   | окисленная густовкрапленная руда             | 1192 ро       | -0,8                 |
|   | вкрапленная руда                             | 1192-1 pn     | -0,7                 |
|   | вкрапленная руда                             | 1192-4 ро     | -1,0                 |
|   | вкрапленная руда                             | 1192-4 chp    | -1,2                 |
|   | вкрапленная руда                             | 1192-5 ро     | -1,0                 |
|   | прожилково-вкрапленная руда                  | 1192-6 ро     | -1,1                 |
|   | прожилково-вкрапленная руда                  | 1192-6 pn     | -1,1                 |

Окончание табл. 1

| Месторождение, рудопроявление   | Материал, из которого отобраны сульфиды | Номер образца | $d^{34}\text{S}$ , ‰ |
|---|---|---------------|----------------------|
| <i>Линзы, гнезда сульфидов и крупные вкрапленники в тальк-биотит-амфиболовой породе</i>                         |   |               |                      |
| Аннабергитовая шель   | брекчиевидная руда                      | к-437/1 ро    | -1,1                 |
|   | вкрапленная руда                        | к-438/1 ро    | -0,7                 |
|   | вкрапленная руда                        | к-438/4 ро    | -1,4                 |
| <i>Редкая вкрапленность в биотит-амфиболовых габбропироксенитах (1017); плагиоклаз-амфиболовых меладиоритах</i> |   |               |                      |
| Олень   | вкрапленная руда                        | 1031 ро       | 0,1                  |
|   | вкрапленная руда                        | 3000-4 ро     | -1,0                 |
|   | вкрапленная руда                        | 1017 ро       | -1,9                 |
| <i>Примечание. ро – пирротин, рп – пентландит, срп – халькопирит, ру – пирит</i>                                |   |               |                      |



**Рис. 1. Изотопный состав серы в пирротине (ро), пентландите (рп), халькопирите (срп) из различных типов руд КНП**

Сульфиды из разных типов руд, отобранные с разных горизонтов рудного тела 1 месторождения Шануч (по скважинам 107, 110, 132), показали незначительные вариации изотопного состава серы в пирротинах (от +2,0 до +2,7 ‰), причем отмечается устойчивое утяжеление  $\delta^{34}\text{S}$  по сравнению с метеоритной. Необходимо также отметить тот факт, что верхние горизонты пятнисто-полосчатых и прожилковых руд, из которых отобраны монофракции пирротинов, являются

более утяжеленными (+2,7‰) относительно массивных и брекчиевидных руд (+2,0 ÷ +2,1‰) более глубоких горизонтов рудного тела.

Сульфиды, образующие сингенетическую вкрапленность в мафит-ультрамафитах южной зоны КНП, по изотопному составу серы незначительно обеднены  $\delta^{34}\text{S}$  по сравнению с серой метеоритов. В пирротинах эта величина изменяется в сравнительно узком диапазоне (-1,9 ÷ -0,1‰). Пентландит и халькопирит ведут себя подобным образом: значения  $\delta^{34}\text{S}$  колеблются в пределах -1,2 ÷ -0,2‰.

Несмотря на то, что сера каждой группы сульфидов изотопно весьма гомогенна, для отдельных образцов установлены внутренние изотопные неоднородности, не характерные для первичных (высокотемпературных) медно-никелевых руд. Они проявлены как в отличиях изотопного состава серы различных сульфидов в образце, так и в вариациях  $\delta^{34}\text{S}$  одного минерала (пирротина).

Как известно, в случае равновесной кристаллизации в ряду пирит-пирротин-халькопирит должно наблюдаться закономерное понижение  $\delta^{34}\text{S}$ , степень которого растет с понижением температуры. В рассматриваемом случае чаще наблюдается обратная картина, что свидетельствует в пользу стадийного (неравновесного) характера минералообразования при несущественной роли температурного фактора разделения изотопов.

В целом, соотношения изотопов серы сульфидов из медно-никелевых объектов КНП, незначительно отличающиеся от соотношений  $\delta^{34}\text{S}$  глубинной мантийной серы, узкий диапазон их вариаций (от -0,1 до +2,7) могут свидетельствовать об едином источнике магматического расплава и говорят о ликвационно-магматическом происхождении сульфидных обособлений. Отмечается сходство изотопного состава серы сульфидов из интрузии Кувалорог с таковой медно-никелевых месторождений Кольского п-ова (Печенгское рудное поле, месторождение Каула) и Канады (Войсис Бей, вкрапленные руды Восточного погружения и массивные руды Овоида и Миниовоида) [7].

Из всех проанализированных проб выделяются две (обр. 1147, 1147-6). Это сульфиды из вкрапленников и прожилков на контакте интрузии с вмещающими породами (обр. 1147, 1147-6, проявление Нижнемедвежье), которые оказались наиболее облегченными серой по сравнению с серой метеоритов. В пирротинах  $\delta^{34}\text{S}$  составляет  $-6,7 \div -6,2 \text{ ‰}$ . Такой состав серы обусловлен, очевидно, наибольшей степенью контаминации у контакта мафит-ультрамафитовой интрузии с вмещающими породами и ксенолитами. Это, вероятно, может свидетельствовать о том, что в результате проявленных мета- постмагматических процессов произошло перераспределение серы, что выразилось в повышении содержания ее легкого изотопа, а пирротины здесь оказались безникелевыми. Ряд авторов [2, 10] считает, что большинство медно-никелевых руд характеризуется положительными  $\delta^{34}\text{S}$ , а отрицательные значения этого параметра (за редким исключением) обычны для метаморфизованных участков рудоносных массивов. Наложённые процессы в таких участках приводят к перераспределению не только никеля, но и благородных металлов.

Перечисленные признаки позволяют предполагать мета-постмагматическое происхождение по крайней мере части сульфидов. Этот вывод не исключает первичномагматическую природу серы, но подразумевает высокую вероятность ее переотложения. В пользу этого свидетельствует и внешний облик проанализированных пород, измененных вторичными процессами (тремолитизация, карбонатизация, оталькование и т.п.).

Авторы выражают благодарность руководству ЗАО НПК «Геотехнология» за предоставленную возможность изучения рудопроявлений Камчатской никеленосной провинции.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полферов Д.В. Геология, геохимия и генезис месторождений медно-никелевых руд // Л.: Недра. 1979. 294 с.

2. Кременецкий А.А., Трухин Ю.П. и др. Отчет «Проведение комплекса работ, связанных с геологическим изучением платиново-медно-никелевых руд

в южной части Дукукского никеленосного рудного узла Квинум-Кувалорогской зоны». 2003 г. Т. I. 331 с.

3. *Надретт А.Дж.* Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. Санкт-Петербург. СПбГУ. 2003. 487 с.

4. *Лихачев А.П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения // М.: Эслан. 2006. 496 с.

5. *Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е.* Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. № 5. С. 75–81.

6. *Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е.* Шанучское медно-никелевое рудное поле (Камчатка) // Вестник СВНЦ ДВО РАН, 2011, №1, С. 20–26.

7. *Трухин Ю.П., Сидоров М.Д., Степанов В.А., Кунгурова В.Е.* Строеение и никеленосность Кувалорогского базит-ультрабазитового массива // Геология и разведка. 2009. № 6. С. 43–49.

8. *Кунгурова В.Е., Степанов В.А., Трухин Ю.П.* Медно-никелевое рудопроявление Аннабергитовая шель Камчатской никеленосной провинции // Горно-информационный аналитический бюллетень. М.: ЗАО «Горная книга». Отдельный выпуск № 2 «Камчатка». 2014. С. 324–333.

9. *Кунгурова В.Е., Трухин Ю.П., Кувакин Г.В.* Сульфидное медно-никелевое рудопроявление Рассоха (Дукукский рудный район, Камчатка) // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». 2016. С. 72–83.

10. *Гриненко Л.Н., Минеев С.Д.* Условия становления массива Кувалорог (Центральная Камчатка) и связанного с ним оруденения по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. 1984. № 10. С. 1491–1502. **ТИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

---

*Кунгурова Валентина Егоровна* – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, kunwe@rambler.ru,

*Трухин Юрий Петрович* – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геохимии и геотехнологии, ytrukhin2@yandex.ru,

*Степанов Виталий Алексеевич* – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геохимии и геотехнологии, vitstepanov@yandex.ru,

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.



**ISOTOPIC COMPOSITION OF SULFIDES SULFUR OF NICKELIFEROUS INTRUSIONS OF KAMCHATKA NICKELIFEROUS PROVINCE**

Kungurova V.Ye., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, kunwe@rambler.ru, Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia,

Trukhin Yu.P., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist of geochemistry and geotechnology, ytrukhin2@yandex.ru, Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia,

Stepanov V.A., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief research scientist of geochemistry and geotechnology, vitstepanov@yandex.ru, Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

---

The isotopic composition of sulfur  $\delta^{34}\text{S}$  in monomineral samples of sulfides selected from various types of ores and mineralized rocks of Kamchatka nickeliferous province (KNP) was determined. According to the isotopic sulfur composition two groups were selected: the Shanuch deposit samples characterized by a high concentration of heavy isotope ( $\delta^{34}\text{S} +2,0 - +2,7 \text{‰}$ ), and samples of Kavalorog ore field enriched by a light sulfur isotope which  $\delta^{34}\text{S}$  ranges within  $-0,1 - -1,9 \text{‰}$ . In general, sulfides sulfur is characterized by a narrow dispersion of isotopic relations and this value is close to the meteoritic sulfur.

Key words: Kamchatka nickeliferous province, isotopic sulfur composition, mafite-ultramafite intrusions, copper-nickel mineralization.

**REFERENCES**

1. Polferov D.V. *Geologija, geohimija i genezis mestorozhdenij medno-nikelevyh rud* (Geochemistry and Genesis of deposits of copper-Nickel ores) // Leningrdsd: Nedra. 1979. 294 p.
2. Kremeneckij A.A., Truhin Ju.P. i dr. Otchet «Provedenie kompleksa rabot, svjazannyh s geologicheskim izucheniem platinovo-medno-nikelevyh rud v juzhnoj chasti Dukukskogo nikelenosnogo rudnogo uzla Kvinum-Kuvalorogskoj zony». 2003 g. T. I. 331 p.
3. Naldrett A.Dzh. *Magmaticheskie sulfidnye mestorozhdenija medno-nikelevyh i platinometal'nyh rud* (Magmatic sulphide deposits of copper-Nickel and PGE ores). Sankt-Peterburg, SPbGU.2003. 487 p.
4. Lihachev A.P. *Platino-medno-nikelevye i platinovye mestorozhdenija* (Platinum-copper-Nickel and platinum deposits) // Moscow: Jeslan. 2006. 496 p.
5. Truhin Ju.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D., Kungurova V.E. *Shanuchskoe medno-nikelevoe mestorozhdenie: geologo-geofizicheskaja model', sostav i geohimija rud* (Shanuchskoye copper-Nickel Deposit: geological-geophysical model, the composition and Geochemistry of ores) // Rudy i metally. 2009. No 5. pp. 75–81.
6. Truhin Ju.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D., Kungurova V.E. *Shanuchskoe medno-nikelevoe rudnoe pole (Kamchatka)* (Shanuchskoye copper-Nickel ore field (Kamchatka)) // Vestnik SVNC DVO RAN, 2011, No 1, pp. 20–26.
7. Truhin Ju.P., Sidorov M.D., Stepanov V.A., Kungurova V.E. *Stroenie i nikelenosnost' Kuvalorogskogo bazit-ul'trabazitovogo massiva* (Structure and nicolenicole Kavalorovi-cha basic-ultrabasite massif) // Geologija i razvedka. 2009. No 6. pp. 43–49.



8. Kungurova V.E., Stepanov V.A., Truhin Ju.P. *Medno-nikelevoe rudoprojavenie Annabergitovaja shhel' Kamchatskoj nikelenosnoj provincii* (Copper-Nickel ore occurrence Annaberdijeva slit Kamchatka Nickel province) // Gorno-informacionnyj analiticheskij bjulleten'. M.: ZAO «Gornaja kniga». Otdel'nyj vypusk № 2 «Kamchatka». 2014. pp. 324–333.

9. Kungurova V.E., Truhin Ju.P., Kuvakin G.V. *Sulfidnoe medno-nikelevoe rudoprojavenie Rassoha (Dukuskij rudnyj rajon, Kamchatka)* (Copper-nickel Sulfide ore occurrence Rassokha (Tucuxi ore district, Kamchatka)) // GIAB No 11, Special'nyj vypusk № 31 «Kamchatka-3». 2016. pp. 72–83.

10. Grinenko L.N., Mineev S.D. *Uslovija stanovlenija massiva Kuvalorog (Central'naja Kamchatka) i svjazannogo s nim orudenenija po izotopno-geohimicheskim dannym* (Conditions of formation of the array Kuvalorog (Central Kamchatka) and its associated mineralization isotopic-geochemical data) // Geohimija. 1984. No 10. pp. 1491–1502.