

## ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ПОРОД КРИВОРОЖСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ

**Ю.А. Фомин<sup>1</sup>, Ю.Н. Демихов<sup>2</sup>, В.Г. Верховцев<sup>3</sup>, Н.М. Борисова<sup>4</sup>, З.Н. Кравчук<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», Киев, Украина,  
E-mail: yaf1941@gmail.com  
Кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник.

<sup>2</sup> ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», Киев, Украина,  
E-mail: y\_demikhov@ukr.net  
Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией.

<sup>3</sup> ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», Киев, Украина,  
E-mail: Verkhovtsev@ukr.net  
Доктор геологических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом.

<sup>4</sup> ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», Киев, Украина,  
E-mail: IGNS\_Borysova@nas.gov.ua  
Ведущий инженер.

<sup>5</sup> ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», Киев, Украина,  
E-mail: IGNS\_Kravchuk@nas.gov.ua  
Ведущий инженер.

Впервые проведено детальное комплексное изотопно-геохимическое исследование керна Криворожской сверхглубокой скважины – серы сульфидов, кислорода и углерода карбонатов, углерода в графите и кислорода в магнетите. Криворожская сверхглубокая скважина является первой и пока единственной сверхглубокой скважиной в пределах Украины. Исследованы все свиты криворожской серии раннего протерозоя, а также плагиограниты днепропетровского комплекса архейского фундамента. Выявлена вертикальная изотопно-геохимическая зональность углерода и кислорода карбонатов, которая подчиняется отчётливой общей тенденции постепенного облегчения обоих элементов на глубину с одновременной их гомогенизацией. Карбонаты в ряду «галька и исходно осадочный прослой – деформированная галька с переотложенным веществом – жильно-метасоматические зоны» характеризуются закономерным и постепенным изменением изотопного состава кислорода и углерода. Установленная зональность, по всей вероятности, отражает влияние температурных условий на фракционирование углерода и кислорода в процессе метаморфогенного перераспределения карбонатного материала. Наблюдается утяжеление изотопного состава углерода графита с увеличением степени метаморфизма пород.

*Ключевые слова:* Криворожская сверхглубокая скважина; изотопно-геохимическая зональность; криворожская серия; днепропетровский комплекс; изотопы серы, кислорода и углерода.

## ISOTOPE-GEOCHEMICAL ZONATION OF ROCKS OF THE KRIVOY ROG SUPER-DEEP WELL

**Yu.O. Fomin<sup>1</sup>, Yu.M. Demikhov<sup>2</sup>, V.G. Verkhovtsev<sup>3</sup>, N.M. Borisova<sup>4</sup>, Z.M. Kravchuk<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine,  
E-mail: yaf1941@gmail.com  
Candidate of geological-mineralogical sciences, assistant professor, leading researcher.

<sup>2</sup> State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine,  
E-mail: y\_demikhov@ukr.net  
Candidate of geological-mineralogical sciences, senior research fellow, head of the laboratory.

<sup>3</sup> State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine,  
E-mail: Verkhovtsev@ukr.net  
Doctor of geological sciences, senior research fellow, head of department.

© Ю.А. Фомин, Ю.Н. Демихов, В.Г. Верховцев, Н.М. Борисова, З.Н. Кравчук, 2019

<sup>4</sup> State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine,  
E-mail: IGNS\_Borysova@nas.gov.ua  
Lead Engineer.

<sup>5</sup> State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine,  
E-mail: IGNS\_Kravchuk@nas.gov.ua  
Lead Engineer.

The complex of detail isotope-geochemical study of the Krivoy Rog super-deep well core was carried out for the first time: sulfides of sulfur, oxygen and carbon of carbonates, carbon in graphite and oxygen in magnetite. Krivoy Rog super-deep well is the first and so far the only super-deep well within Ukraine. The research covers all the Krivoy Rog series of the Early Proterozoic series, as well as the plagiogranites of the Dnepropetrovsk complex of the Archaean basement. Vertical isotope-geochemical zoning of carbon and oxygen of carbonates with simultaneous homogenization of the isotopic composition of elements to depth has been revealed. Carbonates in the series “pebbles and the initial sedimentary layer – deformed pebbles with redeposited matter – vein-metasomatic zones” are characterized by a regular and gradual change in the isotopic composition of oxygen and carbon. The established zonality, in all probability, reflects the influence of temperature conditions on the fractionation of carbon and oxygen in the process of metamorphogenic redistribution of carbonate material. Weighting of carbon graphite isotopic composition with increasing degree of metamorphism of rocks is observed.

*Key words:* Krivoy Rog super-deep well; isotope-geochemical zoning; Krivoy Rog series; Dnepropetrovsk complex; sulfur; oxygen and carbon isotopes.

## ІЗОТОПНО-ГЕОХІМІЧНА ЗОНАЛЬНІСТЬ ПОРІД КРИВОРІЗЬКОЇ НАДГЛИБОКОЇ СВЕРДЛОВИНИ

**Ю.О. Фомін<sup>1</sup>, Ю.М. Деміхов<sup>2</sup>, В.Г. Верховцев<sup>3</sup>, Н.М. Борисова<sup>4</sup>, З.М. Кравчук<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна,  
E-mail: yaf1941@gmail.com  
Кандидат геолого-мінералогічних наук, доцент, провідний науковий співробітник.

<sup>2</sup> ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна,  
E-mail: y\_demikhov@ukr.net  
Кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторії.

<sup>3</sup> ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна,  
E-mail: Verkhovtsev@ukr.net  
Доктор геологічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу.

<sup>4</sup> ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна,  
E-mail: IGNS\_Borysova@nas.gov.ua  
Провідний інженер.

<sup>5</sup> ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна,  
E-mail: IGNS\_Kravchuk@nas.gov.ua  
Провідний інженер.

Вперше проведено детальне комплексне ізотопно-геохімічне дослідження керна Криворізької надглибокої свердловини – сірки сульфідів, кисню і вуглецю карбонатів, вуглецю в графіті і кисню в магнетиті. Криворізька надглибока свердловина є першою і поки єдиною надглибокою свердловиною в межах України. Досліджено всі світи криворізької серії раннього протерозою, а також плагіограніти дніпропетровського комплексу архейського фундаменту. Виявлено вертикальну ізотопно-геохімічну зональність вуглецю і кисню карбонатів, яка підпорядковується виразній загальній тенденції поступового полегшення обох елементів на глибину з одночасною їх гомогенізацією. Карбонати в ряду «галька і вміщуючі осадові шари – деформована галька з перевідкладеною речовиною – жильні-метасоматичні зони» характеризуються закономірною і поступовою зміною ізотопного складу кисню і вуглецю. Встановлена зональність, ймовірно, відображає вплив температурних умов на фракціонування вуглецю і кисню в процесі метаморфогенного перерозподілу карбонатного матеріалу. Спостерігається поважчання ізотопного складу вуглецю графіту зі збільшенням ступеня метаморфізму порід.

*Ключові слова:* Криворізька надглибока свердловина; ізотопно-геохімічна зональність; криворізька серія; дніпропетровський комплекс; ізотопи сірки, кисню та вуглецю.

**Вступление**

Криворожская сверхглубокая скважина (КСГС) является первой и пока единственной сверхглубокой скважиной в пределах Украины. Результаты изучения керн КСГС отражены в ряде работ [Белевцев, 1987; Курлов, Касабов, 1991; Криворожская..., 2011], однако, на наш взгляд, изотопные исследования в них представлены в недостаточном объеме.

**Результаты исследований и их обсуждение**

Нами проведено детальное комплексное изотопно-геохимическое исследование каменного материала КСГС, а именно: изотопного состава серы сульфидов, кислорода и углерода карбона-

тов, углерода в графите и кислорода в магнетите. Исследованы все подразделения криворожской серии раннего протерозоя (сверху вниз): латовская, новокриворожская, скелеватская, саксаганская, гданцевская и глееватская свиты, а также плагиограниты днепропетровского комплекса архейского фундамента. Возраст криворожской серии и днепропетровских гранитоидов определен непосредственно по материалу этой скважины Д.Н. Щербаком в 2000-2330 и 3100-3800 млн лет, соответственно (устное сообщение). Диапазон глубин отбора проб для изотопных определений составляет от 160 до 3400 м. В обобщенном виде полученные результаты сведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Обобщенная изотопно-геохимическая характеристика геологического разреза КСГС**Table 1.** Generalized isotope-geochemical characteristics of the geological section of the Krivoy Rog super-deep well

Сульфиды	Карбонаты		Графит	Магнетит
$\delta^{34}\text{S}$ , ‰	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰
Глееватская свита				
-3,9...+12,1 (10)	+10,0...+27,3 (47)	-14,6...0 (47)	—	—
Гданцевская свита				
-9,5...+18,6 (15)	+15,3...+19,5 (8)	-12,3...-3,6 (8)	-21,3...-31,3 (9)	—
Саксаганская свита				
-11,8...+16,5 (10)	+15,5...+21,6 (4)	-7,5...+0,8 (4)	—	+3,3...+9,3 (16)
Скелеватская свита				
+1,2...+3,0 (2)	+15,2...+18,0 (5)	-6,7...-5,2 (5)	—	—
Новокриворожская свита				
0,7 (1)	+16,2 (1) —	7,2 (1)	—	—
Латовская свита				
-9,5...-8,5 (2) —	—	—	—	—
Днепропетровский комплекс				
-0,7...+11,3 (7)	+11,8...+17,2 (11)	-11,2...-7,2 (11)	-21,5...-22,2 (3)	—

*Примечание.* Точность определения изотопного состава: серы относительно троилита, углерода относительно PDB  $\pm 0,2-0,3\%$ ; кислорода относительно SMOW  $\pm 0,3-0,5\%$ . В скобках указано количество определений.

*Note.* Accuracy of the isotope composition determination: sulfur relative to troilite, carbon relative to PDB  $\pm 0.2-0.3\%$ ; oxygen relative to SMOW  $\pm 0.3-0.5\%$ . The number of definitions is indicated in parentheses.

*Сера сульфидов.* Сульфиды КСГС (пирит, пирротин) в морфологическом отношении имеют всю гамму переходов: рассеянную вкрапленность ксеноморфных зерен, послойные вкрапленность и прожилки, секущие прожилки и гнезда, метакристаллы субгексаэдрической формы. Эти

переходы проявляются в относительно небольших участках пород, нередко в пределах одного шлифа. Генетически на них сказывается влияние различных процессов – регионального метаморфизма, диафореза и метасоматоза (седиментогенные их модификации в разрезе КСГС

не установлены). Существенного перераспределения изотопов серы при этом не происходит [Белевцев и др., 1978]. Исключение из этого правила, по нашим наблюдениям, составляют эпитеpmальные (контактово-реакционные) процессы, происходящие на границах различных в геохимическом (и изотопном) отношении сред, например на границе отложений саксаганской (джеспилитовой) и гданцевской (существенно карбонатной) свит. В упомянутом случае на пирит из катаклазированных пород верхних частей железистых горизонтов явно влияют сульфиды гданцевской свиты.

С учётом этих оговорок изотопный состав серы изученных минералов может использоваться для целей корреляции разрезов КСГС и других районов Криворожья, по которым опубликован обширный материал, а также для ретраверсии условий их формирования (табл. 2).

Результаты по КСГС подтверждают сделанные ранее генетические выводы (источники серы и механизмы её фракционирования) и, кроме того, позволяют установить ритмичный, по-видимому, согласующийся с ритмично изменяющимися условиями седиментогенеза, характер изменения  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов по разрезу серии. Таков характер вариации изотопов серы в рамках скелеватской и саксаганской свит, таков он и в образованиях верхних свит, хотя граница между саксаганской и гданцевской свитами имеет принципиальное значение с точки зрения изменения условий литогенеза.

Метасоматические процессы, развитые локально, по-разному влияют на соотношение серы в пирите. Образование кварц-диоксид-карбонатных с пиритом пород типа скарноидов, обнаруженных в единичных случаях (глубина 1705,6 м), по-видимому, не сопровождалось существенным фракционированием изотопов серы (табл. 2). В ореолах кварц-полевошпатовых с мусковитом, карбонатом, пиритом и гематитом метасоматитов сульфидный материал переотлагался с частичным выносом из внешних и, особенно, промежуточных зон и отложением в центральных и жильных зонах в виде метакристаллов, гнёзд и прожилков. Сера перераспределялась соответственно от облегченной (до  $-9,5\%$ ) во внешних зонах до утяжеленной (до  $+11,3\%$ ) в жилах (табл. 2).

*Кислород и углерод карбонатов.* Изученные карбонаты определены как доломит – железистый доломит, кальцит и анкерит. В геологиче-

ском отношении они могут быть отнесены к следующим типам:

1. Тонкие прослои в составе сланцев скелеватской и глееватской свит, сложенные в основном исходно осадочным доломитом и его железистой разновидностью. В участках такого переслаивания обычно присутствует и перераспределённый метасоматический карбонат. По морфологическим особенностям минералов в составе графит-карбонатных пород гданцевской свиты и изотопному составу углерода и кислорода кальцита мы также относим его к первично-осадочному с последующим переотложением.

2. Галька различной степени деформированности в метаконгломератах глееватской свиты, сложенная мелкозернистыми доломитом – железистым доломитом и кальцитом.

3. Гнёзда, жилки и прожилки мелкозернистых доломита, кальцита, анкерита с околожильным метасоматическим изменением в составе всех подразделений разреза КСГС. Состав метасоматитов, определяющийся в значительной степени составом эдукта, существенно кварц-альбит-мусковитовый с микроклином, турмалином, апатитом, метасоматическими карбонатами и пиритом.

4. Жилки, гнёзда, цемент брекчий в зонах катаклаза, брекчирования и диафтореза пород с преимущественным развитием типично жильного средне-крупнокристаллического кальцита, реже анкерита и железистого доломита. Такая карбонатная модификация отмечается по всему изученному разрезу КСГС.

Результаты изотопного изучения карбонатов приведены в табл. 3 и на рис. 1, 2. Изотопные вариации кислорода и углерода в минералах при всём их геологическом и изотопном разнообразии подчиняются отчётливой общей тенденции постепенного облегчения обоих элементов на глубину от 160 до 3480 м с одновременной гомогенизацией их изотопного состава (рис. 2). Установленная вертикальная изотопно-геохимическая зональность, как видно на рис. 2, проявляется неодинаково в различных частях разреза КСГС.

В верхней части разреза, сложенной метаконгломератами глееватской свиты, карбонаты обнаруживают наиболее широкие вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  ( $+10,0\dots+27,3\%$ ) и  $\delta^{13}\text{C}$  ( $-14,6\dots0\%$ ), связанные с морфологией, относительным временем выделения и составом минералов. Рис. 1 демонстрирует, что карбонаты в ряду «галька и исходно осадочный прослой – деформированная



**Таблица 2.** Вариации изотопного состава серы сульфидов в разрезе КСГС и соседних участков Кривбасса**Table 2.** Variations in the isotope composition of sulfide sulfur in the section of the Krivoy Rog super-deep well and adjacent sections of the Krivbass

Вмещающие породы	Сульфиды, формы выделения	$\delta^{34}\text{S}$ , ‰	
		КСГС	Кривбасс
Днепропетровский комплекс. Плагиограниты, амфиболиты	Пирит вкрапленный	-0,7...+3,1 (2)	—
Латовская свита. Кварциты, кварц-мусковитовые породы	Пирит, вкрапленность, гнёзда по трещинам	-9,5...-8,5 (2)	—
Новокриворожская свита. Амфиболиты, катаклаз, диафторез	Пирит, вкрапленность, гнёзда, прожилки	-0,7 (1)	-0,3...+1,0
Скелеватская свита. Филитовидные сланцы с графитом	Пирит, пирротин, прожилки, вкрапленность	+1,2...+3,0 (2)	-5,7...+2,9
Саксаганская свита. Сланцы кварц-биотитовые с гранатом, амфиболом, хлоритом, графитом, карбонатами	Пирит, пирротин, послойная вкрапленность, гнёзда, прожилки	-5,3...-3,4 (3)	-7,3...+3,5
То же. Куммингтонитовые сланцы	Пирит, вкрапленность, послойные прожилки	—	-1,6...+4,6
То же. Кварциты с карбонатами, хлоритом и магнетитом	Пирит, секущие прожилки, метакристаллы, гнёзда	-11,8 (1)	—
То же. Железистые кварциты, магнетит-амфиболовые сланцы	Пирит, прожилки, послойная вкрапленность, гнёзда	—	-16,5...+4,6
То же. Катаклазиты железистых кварцитов верхней части свиты с карбонатами и хлоритом	Пирит, секущие прожилки, вкрапленность, гнёзда в участках катаклаза	+2,2...+14,6 (5)	—
То же. Железистые кварциты, богатые руды, карбонатизация. Верхние горизонты свиты	Пирит, секущие прожилки, метакристаллы, гнёзда, вкрапленность	—	-1,3...+47,3
То же. Щелочно-карбонатные метасоматиты по породам свиты	Пирит, метакристаллы, тонкая вкрапленность, прожилки	—	-20,2...+4,4
Гданцевская свита. Сланцы кварц-биотитовые с полевыми шпатами, гранатом, карбонатами, графитом	Пирит, пирротин, послойная вкрапленность	+7,2...+18,6 (7)	+1,0...+17,2
То же. Сланцы катаклазированные с карбонатами, хлоритом, мусковитом	Пирит, пирротин, послойная вкрапленность. Пирит – метакристаллы, гнёзда, вкрапленность	-2,8...+4,2 (6)	—
То же. Карбонатные породы	Пирит, вкрапленность, прожилки	—	+2,7...+35,7
То же. Кварц-диопсид-карбонатные породы, скарноиды	Пирит, метакристаллы, гнёзда, прожилки	+13,6 (1)	+9,0...+24,2
То же. Сланцы карбонатизированные	Пирит, вкрапленность	—	+8,9...+20,8
То же. Метасоматиты щелочные, кварц-слюдистые	Пирит, вкрапленность, секущие прожилки	-9,5 (1)	-12,0...-7,7
То же. Изменённые сланцы	Пирит в зальбандах кварцевых жил	-5,3 (1)	-9,5...+5,8
Глееватская свита. Метаконгломераты	Пирит, послойная вкрапленность в гальке	+11,2...+12,1 (3)	—
То же. Метапесчаники и метаалевролиты с карбонатами	Пирит, пирротин, прожилки, вкрапленность, каёмки	-3,9...+6,8 (6)	—

*Примечание.* Точность определения изотопного состава серы относительно троилита  $\pm 0,2-0,3\%$ . В скобках указано количество определений.

*Note.* The accuracy of the isotope composition determining of sulfur relative to troilite is  $\pm 0.2-0.3\%$ . The number of definitions is indicated in parentheses.

галька с переотложенным веществом – жильно-метасоматические зоны» характеризуются закономерным и постепенным изменением изотопного состава кислорода и углерода. Кислород в этом ряду последовательно и существенно облегчается, углерод от первых ко вторым несколько утяжеляется, затем заметно облегчается. Указанная тенденция является естественной для гидротермально-метасоматических карбонатов, формирующихся за счёт первично-осадочного материала и, вероятно, отражает вариации температуры их отложения и переотложения [Фомин,

Коростышевский, 1986]. При этом обращает внимание облегчённость углерода наложенных железистого доломита и анкерита по сравнению с углеродом такого же кальцита. Общее обогащение изотопом  $^{12}\text{C}$  карбоната гальки по сравнению с осадочными карбонатами, за счёт которых эта галька образовалась, свидетельствует о диагенезе осадков в условиях аэрации [Галимов, 1968]. Сравнительное обогащение этим изотопом железистых карбонатов в составе жильно-метасоматических зон может быть объяснено вовлечением в процесс карбонатообразования некоторого

**Таблица 3.** Изотопный состав кислорода и углерода карбонатов в разрезе КСГС

**Table 3.** Isotopic composition of oxygen and carbon of carbonates in the section of Krivoy Rog super-deep well

Свита. Породы	Минерал	n	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰
Глееватская свита. Карбонатная галька в метаконгломератах	Доломит	1	+22,1 –8,9	
	Кальцит	1	+23,1	–1,8
То же. Деформированная галька с переотложением вещества	Доломит, железистый доломит	10	+13,1...+27,3	–7,6...–1,0
	Кальцит	9	+10,0...+18,2	–6,8...–0,5
То же. Жильные карбонаты с околожильным метасоматозом	Доломит, анкерит	5	+12,7...+25,6	–8,4...–2,1
	Кальцит	5	+14,8...+24,4	–4,6...0
То же. Карбонаты жил, гнезд, цемента в диафторитах	Железистый доломит, анкерит	6	+15,8...+19,7	11,4...–6,3
	Кальцит	9	+14,9...+20,9	–14,6...–7,2
То же. Метасоматические зонки	Доломит	1	+25,1	–6,9
Гданцевская свита. Графит-карбонатные породы	Кальцит	5	+15,4...+19,5	–7,5...–3,6
То же. Диафториты с жильным кальцитом	Кальцит, анкерит	3	+15,3...+19,3	–12,3...–8,0
Саксаганская свита. Карбонаты в зонах дробления джеспилитов	Железистый карбонат	1	+17,7	–4,9
	Кальцит	2	+15,5...+21,6	–7,5...+0,8
То же. Диафториты по сланцам	»	1	+17,5	–6,8
Скелеватская свита. Прослой карбонатов в сланцах	Железистый карбонат	2	+16,3	–6,4...–5,2
То же. Метасоматический карбонат в сланцах	»	1	+15,2	–5,2
То же. Жильные зонки в сланцах	Кальцит	2	+15,5...+18,0	–6,7
Новокриворожская свита. Жильные карбонаты в амфиболитах	Железистый карбонат	1	+16,2	–7,2
Днепропетровский комплекс. Гранитоиды измененные	Железистый кальцит	6	+11,8...+14,9	–11,2...–7,2
То же. Останцы амфиболитов с жильными карбонатами	»	2	+12,7...+14,4	–9,4...–8,8
То же. Участки микрогнейсов с гнездами и жилками кальцита	Кальцит	3	+15,2...+17,2	–12,1...–8,5

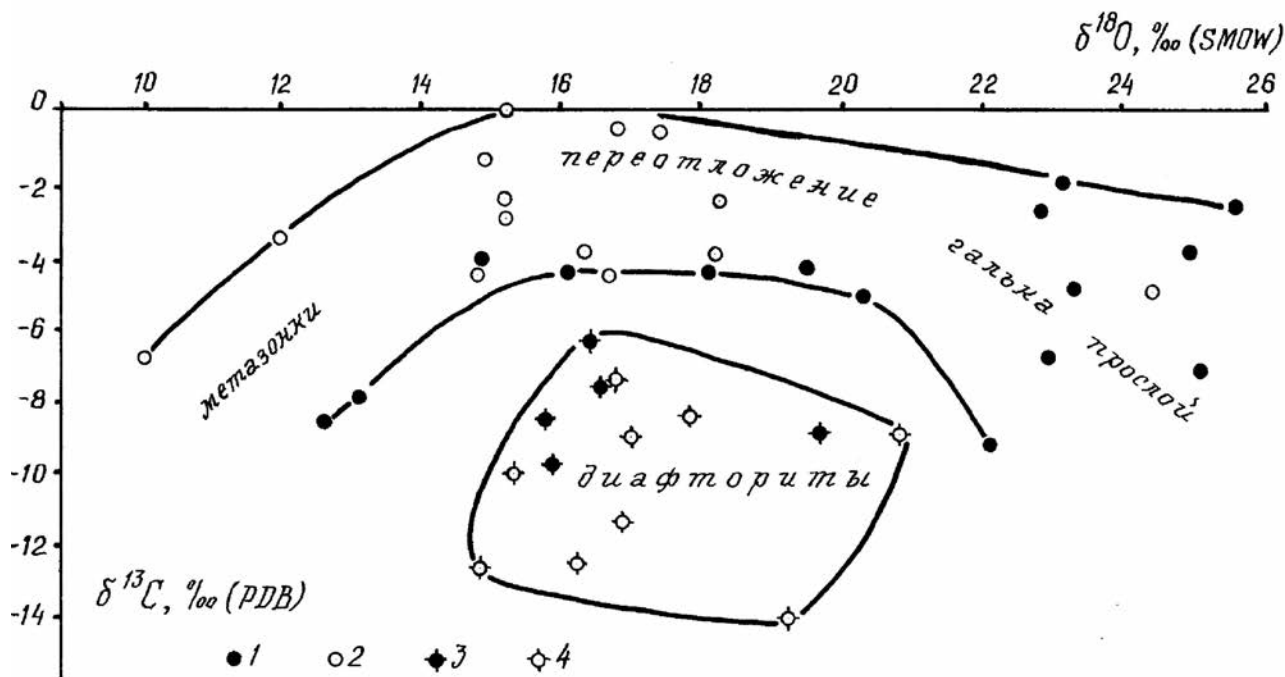


Рис. 1. Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов глееватской свиты

1 – доломит – железистый доломит; 2 – кальцит (оба минерала в системе «галька – деформированная галька – жильно-метасоматические зонки»); 3 – железистые карбонаты; 4 – кальцит (оба минерала в диафторитах)

Fig. 1. Isotopic composition of carbonates carbon and oxygen of the Gleevat formation

1 – dolomite - ferrous dolomite; 2 – calcite (both minerals in the system «shingle – deformed shingle – vein-metasomatic zones»); 3 – ferrous carbonates; 4 – calcite (both minerals in diaphthorites)

количества лёгкого углерода графита при наличии в качестве окислителя ионов трёхвалентного железа [Белевцев и др., 1984]. Более поздним наложенным карбонатам зон катаклаза, брекчирования и диафтореза (тип 4), в сравнении с минералами описанного выше ряда, присущи гомогенизированный кислород и аномально лёгкий углерод. Последний испытал сильное влияние углерода графита в окислительных условиях. Подробнее о графите скажем далее.

В нижней части разреза (гданцевская свита и ниже) диапазон вариаций  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  постепенно сужается, уменьшаются и различия между карбонатами, относящимися к разным морфологическим типам и генерациям и имеющими разный химический состав. Описанные выше тенденции, тем не менее, сохраняются, особенно по изотопному составу углерода карбонатов железистых и безжелезистых, жильно-метасоматических и диафторитовых. Наиболее гомогенизированным кислородом и углеродом обладают карбонаты на уровне пород днепропетровского комплекса.

Соотношение изотопов кислорода и углерода в карбонатах отдельных подразделений разреза

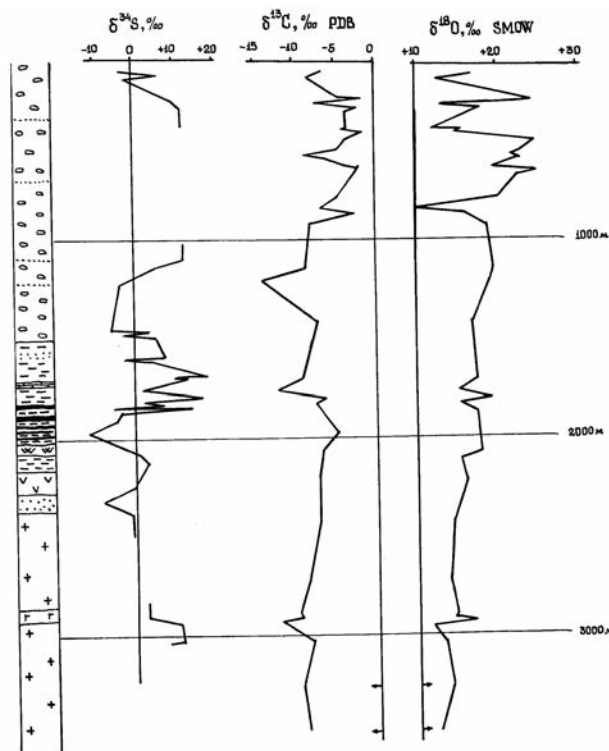


Рис. 2. Вариации  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов (пирит) и  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  карбонатов в разрезе КРСГ

Fig. 2. Variations of  $\delta^{34}\text{S}$  sulfides (pyrite) and  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  carbonates in the section of Krivoy Rog super-deep well



КСГС определяется указанной вертикальной изотопно-геохимической зональностью и нарушается в связи с наличием тектонических зон, например, на границе гданцевской и саксаганской свит, а также в гранитоидах на глубине 2900-3000 м.

Установленная зональность, по всей вероятности, отражает влияние температурных условий на фракционирование углерода и кислорода в процессе метаморфогенного перераспределения карбонатного материала при близко расположенном источнике последнего (криворожская серия в седиментогенном варианте). Она соответствует вертикальной температурной зональности, установленной по КСГС [Белевцев, 1987] на основании микроанализа зональных гранатов из сланцев указанной серии. Показано, в частности, существование в Саксаганском районе Кривбасса вертикальной метаморфической зональности, обусловленной сменой на глубинах от 800-1200 до 1600-2000 м в разных частях бассейна пород фации зелёных сланцев породами эпидот-амфиболитовой фации. Согласно сообщению Р.Я. Белевцева [Белевцев, 1987], на глубине около 1 км проходит изотерма 400 °С. Возможно, именно температурным барьером объясняется усиление изотопной гомогенизации обоих элементов карбонатных фаз начиная примерно с такой глубины.

Диапазон значений изотопного состава кислорода карбонатов КСГС близок к значениям, характерным для докембрийских морских карбонатов ( $\delta^{18}\text{O} = 14,0 \dots 25,0\text{‰}$ ) [Галимов, 1968; Галимов и др., 1975]. Однако появление значений  $\delta^{18}\text{O} = 10,0 \div 27,3\text{‰}$ , которые превышают значения, характерные для докембрийских морских карбонатов, ставит под сомнение чисто осадочный генезис. Причиной возникновения широкого диапазона  $\delta^{18}\text{O}$  карбонатов может быть изменение  $\delta^{18}\text{O}$  флюида вследствие его эволюции или смешения разных флюидов [Фомин и др., 2002].

*Углерод графита.* Изучен графит из гданцевской свиты, а также из микрогнейсовых участков в составе днепропетровского комплекса (табл. 1). Графит гданцевской свиты (девять образцов) характеризуется довольно широким диапазоном значений  $\delta^{13}\text{C}$  (от  $-31,3$  до  $-21,3\text{‰}$ , в среднем  $-21,5\text{‰}$ ). Графит, выделенный из микрогнейсов (три образца), отличается более узким диапазоном значений  $\delta^{13}\text{C}$  (от  $-22,5$  до  $-21,5\text{‰}$ ) и некоторым (средним) сдвигом изотопного соотношения в пользу тяжелого изотопа  $^{13}\text{C}$ . Эта

закономерность, вероятно, отражает разный возраст пород, различные *p, t*-условия метаморфизма и, следовательно, различную степень гомогенизации материала при общем соответствии полученных результатов значениям  $\delta^{13}\text{C}$  биогенного вещества. J. Hoefs [Hoefs, 1996] также наблюдал сдвиг в сторону утяжеления углерода в графите с увеличением степени метаморфизма.

*Кислород магнетита.* Изотопный состав кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) магнетитов из железистых кварцитов саксаганской свиты по 16 образцам составляет  $+3,3 \dots +9,3\text{‰}$ , вариации связаны со степенью деформированности и окисленности минералов.

Наши более ранние изотопные исследования магнетита [Фомин и др., 1995] обнаружили отчётливую тенденцию обогащения минерала лёгким изотопом кислорода в системе «вмещающие породы – тектоно-метасоматические зоны» с максимальным количеством изотопа  $^{16}\text{O}$  в наложенном магнетите внешних частей метасоматических ореолов.

На становление изотопно-кислородных соотношений в исходном магнетите джеспилитов существенно влияет минеральный парагенезис: содержание в минерале тяжелого изотопа увеличивается пропорционально количеству в метаморфической породе сидерита (сидероплезита). В системе  $\text{FeCO}_3\text{--Fe}_3\text{O}_4$  между карбонатом и магнетитом устанавливается изотопно-кислородное равновесие, которое (в условиях «сухой» системы) обеспечивается парциальным давлением  $\text{CO}_2$ . Тектоническая деформация пород сопровождается падением давления и выносом из зон нарушения вместе с углекислым газом части тяжелого изотопа кислорода. Этим объясняются достаточно широкие вариации  $\delta^{18}\text{O}$  магнетита в слабо измененных джеспилитах.

Следует отметить наличие среди гранитоидов днепропетровского комплекса участков, сложенных существенно биотитовыми микрогнейсами, обогащенными карбонатами (кальцитом) и графитом. Обращает внимание два обстоятельства. Во-первых, полная аналогия по вещественному, в том числе изотопному, составу таких участков графит-карбонатным породам гданцевской свиты. Во-вторых, весьма интенсивная тектоническая нарушенность этих участков, которые документально отнесены к зонам дробления. Такие зоны разуплотнения проявляются интенсивной эпигенетической карбонатизацией и существенным падением температуры минерало-



образования. Согласно исследованиям гомогенизации флюидных включений Н.Н. Гостяевой (устное сообщение), в участках метасоматического переотложения карбонатов температура опускается до 260-220 °С, а в местах залечивания трещин жильным кальцитом она была еще ниже – до 180-80 °С. Сочетание этих обстоятельств (или признаков) указывает на наличие в этом районе Кривбасса системы крупных сбросов (тектонических клиньев), с погружением фрагментов, сложенных породами криворожской серии в более древние гранитоиды, что подтверждается в работе [Курлов, Касабов, 1991].

### Выводы

КСГС в пределах задокументированного интервала (160-3400 м) не выявила пород, отличных от классических подразделений криворожской серии и днепропетровского комплекса.

### Список литературы

**Белевцев Р.Я.** О геодинамике метаморфизма Криворожского бассейна (по данным сверхглубокого бурения). *Тез. докл. IV Регион. петрограф. совещ. по европейской части СССР*. Петрозаводск, 1987. С. 123-124.

**Белевцев Я.Н., Жуков Ф.И., Скобелев В.М., Радзиховский В.Ф., Мельниченко Б.Ф., Коростышевский И.З., Оверчук В.М.** Особенности формирования докембрийских пород Криворожского железорудного бассейна по данным изотопного состава серы в сульфидах. *Геол. журн.* 1978. Т. 38, № 1 (178). С. 1-19.

**Белевцев Я.Н., Жуков Ф.И., Савченко Л.Т., Оверчук В.М.** Процессы накопления осадков железисто-кремнистой формации Кривого Рога по данным изотопных исследований углерода и серы. *Геол. журн.* 1984. Т. 44, № 2 (215). С. 94-102.

**Галимов Э.М.** Геохимия стабильных изотопов углерода. Москва: Недра, 1968. 226 с.

**Галимов Э.М., Мигдисов А.А., Ронов А.Б.** Вариации изотопного состава карбонатного и органического углерода осадочных пород в истории Земли. *Геохимия*. 1975. № 3. С. 323-342.

### References

**Belevtsev R. Ya.**, 1987. On the geodynamics of the metamorphism of the Krivoy Rog basin (from the data of superdeep drilling). *Proceeding of the IV Regional petrographic meeting on the European part of the USSR*. Petrozavodsk, p. 123-124 (in Russian).

Изотопные исследования подтвердили ранее установленные закономерности для указанных подразделений Украинского щита.

Выявлена вертикальная изотопно-геохимическая зональность углерода и кислорода карбонатных составляющих, которая подчиняется отчётливой общей тенденции постепенного облегчения обоих элементов на глубину с одновременной их гомогенизацией.

Наблюдается утяжеление изотопного состава углерода графита с увеличением степени метаморфизма пород.

Установленная зональность, по всей вероятности, отражает влияние температурных условий на фракционирование углерода и кислорода в процессе метаморфогенного перераспределения карбонатного материала.

**Криворожская** сверхглубокая скважина СГ-8. Шеремет Е.М. (ред.). Донецк: Ноулидж, Дон. отделение, 2011. 555 с.

**Курлов Н.С., Касабов В.В.** Основные результаты бурения Криворожской сверхглубокой скважины. *Сов. геология*. 1991. № 8. С. 69-80.

**Фомин Ю.А., Коростышевский И.Е.** Зависимость изотопного состава кислорода и углерода карбонатов от температуры их образования (в зонах щелочно-карбонатного метасоматоза). *Докл. АН УССР. Сер. Б*. 1986. № 9. С. 28-31.

**Фомин Ю.А., Савченко Л.Т., Иванов А.С.** Природа магнетита золотоносных зеленокаменных структур Среднего Приднепровья (по изотопным и геохимическим данным). *Минерал. журн.* 1995. Т. 17, № 3. С. 67-73.

**Фомин Ю.А., Демихов Ю.Н., Лазаренко Е.Е.** Эволюция карбонатов Севериновского месторождения урана (Украинский щит). *Доп. НАН України*. 2002. № 12. С. 94-98.

**Hoefs, J.** Stable Isotope Geochemistry. 4th ed. Berlin: Heidelberg and New York: Springer-Verlag, 1996. 201 p.

**Belevtsev Ya.N., Zhukov F.I., Skobelev V.M., Radzikhovskiy V.F., Melnichenko B.F., Korostysheskiy I.Z., Overchuk V.M.**, 1978. Peculiarities of the formation of Precambrian rocks of the Krivoy Rog Iron-ore Basin according to the Isotopic Composition of Sulfur in Sulphides. *Geologichnyy zhurnal*, vol. 38, No. 1 (178), p. 1-19 (in Russian).

**Belevtsev Ya.N., Zhukov F.I., Savchenko L.T., Overchuk V.M.**, 1984. Processes of accumulation of precipitates of the iron-siliceous formation of Krivoy Rog from the data of isotope studies of carbon and sulfur. *Geologichnyy zhurnal*, vol. 44, № 2 (215), p. 94-102 (in Russian).

**Galimov E.M.**, 1968. Geochemistry of stable isotopes of carbon. Moscow: Nedra, 226 p. (in Russian).

**Galimov E.M., Migdisov A.A., Ronov A.B.**, 1975. Variations in the isotope composition of the carbonate and organic carbon of sedimentary rocks in the history of the Earth. *Geokhimiya*, No. 3, p. 323-342 (in Russian).

**Kurlov N.S., Kasabov V.V.**, 1991. The main results of drilling the Krivoy Rog superdeep well. *Sovetskaya Geologiya*, No. 8, p. 69-80 (in Russian).

**Krivoy Rog** superdeep well SG-8, 2011. (Ed. Sheremeta E.M.). Donetsk: Nouvelage, Don. detached, 555 p. (in Russian).

**Fomin Yu.A., Korostyshevsky I.E.**, 1986. Dependence of the Isotope Composition of Oxygen and

Carbon Carbonates on the Temperature of Their Formation (in the Areas of Alkaline-Carbonate Metasomatism). *Doklady AN USSR. Ser. B*, № 9, p. 28-31 (in Russian).

**Fomin Yu.A., Savchenko L.T., Ivanov A.S.**, 1995. The nature of magnetite of gold-bearing greenstone structures of the Middle Dnieper (by isotope and geochemical data). *Mineralogicheskiy zhurnal*, vol. 17, No. 3, p. 67-73 (in Russian).

**Fomin Yu.A., Demikhov Yu.N., Lazarenko E.E.**, 2002. Evolution of Carbonates of the Severinovskoye Uranium Deposit (Ukrainian Shield). *Dopovidi NAN Ukrainy*, No. 12, p. 94-98 (in Russian).

**Hoefs, J.**, 1996. Stable Isotope Geochemistry. 4th ed. Berlin: Heidelberg and New York: Springer-Verlag, 201 p. (in English).

Статья поступила  
26.06.2018