

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА УГЛЕРОДИСТЫХ СЛАНЦЕВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ БЕЛОРЕЦКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КУПОЛА)*

© **А.В. Сначев,**

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
Институт геологии,
Уфимский научный центр РАН,
ул. К. Маркса, 16/2,
450077, г. Уфа, Российская Федерация,
эл. почта: savant@rambler.ru

В статье кратко рассмотрено геологическое строение Белорецкого зонального метаморфического комплекса; перечислены свиты, в состав которых входят углеродистые отложения; приводится описание формы нахождения в них углеродистого вещества, изменение его физических свойств и химического состава в процессе контактового и регионального метаморфизма. На основе термического метода изучения углеродистых сланцев зигазино-комаровской свиты установлено, что экзотермический эффект в них происходит в диапазоне температур 630–730 °С, что соответствует зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фациям метаморфизма. Построение карт изолиний значений температур преобразования пород в пределах Белорецкого метаморфического комплекса, а также анализ закономерностей размещения золоторудных объектов в его пределах позволили привязать золоторудную минерализацию к определенному температурному интервалу. Это дает возможность с минимальными затратами оценить перспективы углеродистых отложений Белорецкого метаморфического комплекса на золото и наметить конкретные площади на его поиски.

Ключевые слова: Белорецкий метаморфический купол, Южный Урал, метаморфизм, углеродистые сланцы, черные сланцы, термический метод, рудоносность, золото, благородные металлы, фация зеленых сланцев, зигазино-комаровская свита

© **A. V. Snachev**

THE USE OF THERMAL ANALYSIS OF CARBONACEOUS SHALES IN PREDICTING GOLD MINERALIZATION (WITH THE BELORETSK METAMORPHIC DOME TAKEN AS AN EXAMPLE)

Institute of Geology,
Ufa Scientific Centre,
Russian Academy of Sciences,
16/2, ulitsa K. Marksa,
450077, Ufa, Russian Federation,
e-mail: savant@rambler.ru

The paper briefly discusses the geological structure of the Beloretsk zonal metamorphic complex. It lists the formations containing carbon deposits and describes configurations of carbon matter occurrences as well as changes in its physical properties and chemical composition during contact and regional metamorphism. Based on the thermal method for studying carbonaceous shales of the Zigaza-Komarovo Formation, it has been found that the exothermic reaction in them takes place within the temperature range of 630-730 °C that corresponds to greenschist and epidote-amphibolite facies metamorphism. The construction of temperature contour maps showing rock transformations within the Beloretsk metamorphic complex and analysis of regularities of its gold ore distribution made it possible to correlate gold mineralization to a certain temperature range. This allows us to assess cost-effectively the prospects for finding gold in the carbon deposits of the Beloretsk metamorphic complex and define specific search areas.

Key words: Beloretsk metamorphic dome, South Urals, metamorphism, carbonaceous shales, black shales, thermal method, ore mineralization, gold, noble metals, greenschist facies, Zigaza-Komarovo Formation

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-Поволжье № 14-05-97005.

метаморфический комплекс, центральная часть которого (диаметр 7–8 км) сложена образованиями эклогитовой фации метаморфизма, промежуточная (ширина 2–10 км) – амфиболитовой и внешняя – зеленосланцевой (ширина 15–20 км) (см. рис.1) [2].

Углеродистые отложения развиты в юшинской, машакской, зигальгинской и зигазино-комаровской свитах. Их положение в разрезах и литологический состав довольно подробно рассмотрены в работе [3] и здесь не приводятся.

Наиболее широким распространением углеродистые сланцы пользуются в составе зигазино-комаровской свиты (RF₂zk). Сложна она в переменных соотношениях хлорит-серицит-кварцевыми, слюдисто-кварцевыми, слюдисто-полевошпат-кварцевыми сланцами, кварцевыми алевролитами и песчаниками, обогащенными углеродистым веществом и по петрохимическим особенностям относящиеся к терригенно-углеродистой формации [5]. В сланцах очень часто наблюдается сульфидизация от единичных вкрапленных зе-

рен пирита до образования сульфидных прожилков мощностью до 1 см при содержании сульфидов в породах до 25–30%. Чаще всего в обнажениях и элювиально-делювиальных развалах встречаются в той или иной степени выветрелые породы, в которых на месте первичных сульфидов остаются либо пустоты кубического габитуса, либо образуются зоны кавернозной текстуры, интенсивно ожелезненные. При дальнейшем выветривании на месте таких пород образуются бурые железняки.

Результаты термического анализа (Rock-Eval) углеродистых сланцев зигазино-комаровской свиты Белорецкого метаморфического комплекса показали содержания C_{орг} от 0,76 до 7,22%, что позволяет отнести их к низкоуглеродистому, реже углеродистому типам (табл. 1). Повышенные значения параметра C = CaO + MgO (1,56–9,02; среднее 3,0) для рассматриваемых углеродистых отложений, наличие прослоев известняков в разрезах свидетельствуют о достаточной мелководности бассейна осадконакопления [6].

Таблица 1

Результаты термического анализа (Rock-Eval) углеродистых сланцев зигазино-комаровской свиты

№ п/п	№ обр.	Н.о., %	C _{орг} , %	S1, мг/г	S2, мг/г
1	7503-1	95,94	1,19	0,01	0,00
2	7523	91,66	4,31		
3	7524	98,18	7,22		
4	7505/1	89,33	0,76		

В генетическом отношении углеродистое вещество рассматриваемых пород относится к седиментационно-диагенетическому типу и представлено тонкорассеянной формой выделения. Частицы размером не более 0,005 мм равномерно пропитывают всю массу породы или концентрируются в виде пятен, неправильных и линзовидных скоплений. Такая форма нахождения углеродистого вещества обычно характерна для монотонных или неяснослоистых черносланцевых толщ терригенно-углеродистой формации и свидетельствует о сингенетичности первичных скоплений C_{орг} и осадка [7]. При наличии тонкой

горизонтальной слоистости углеродистое вещество обособляется в виде отдельных слоев толщиной от нескольких миллиметров до 10–15 см. Содержания углеродистого вещества в отложениях терригенно-углеродистой формации зависят от их гранулометрического и вещественного состава и обычно повышаются при увеличении дисперсности осадка. Согласно данным рентгеноструктурного и термографического анализов, а также электронно-микроскопическим наблюдениям, выполненным для терригенно-углеродистых отложений зигазино-комаровской свиты, углеродистое вещество в них соответствует шунгиту [8].

В результате исследований разновозрастных углеродсодержащих отложений Дальнего Востока В.П. Ивановой и другими [9] было установлено, что на всем пути преобразования осадков, от начальных стадий диагенеза до высоких уровней метаморфизма, происходит закономерное изменение химического состава и физических свойств сингенетичного этим осадкам органического вещества,

что определяет высокую геологическую информативность данных соединений. Первостепенным фактором является закономерная зависимость между температурой выгорания рассеянного органического вещества и степенью метаморфизма пород. Причем по мере возрастания регионального метаморфизма закономерно увеличивается температура выгорания $C_{орг}$ (табл. 2).

Таблица 2

Соотношение уровней катагенеза и регионального метаморфизма пород со стадиями преобразования органического вещества [9]

Стадия катагенеза и регионального метаморфизма осадков	Температура выгорания $C_{орг}$, °С	Стадия углефикации и метаморфизма $C_{орг}$
Катагенез (глубинный диагенез)	до 250	Буроугольная
Катагенез и начальные стадии метаморфизма	250–530 540–560	Каменноугольная Шунгитовая
Фация зеленых сланцев	560–660	Графитовая
Эпидот-амфиболитовая фация	660–700	– // –
Амфиболитовая фация	700–800	– // –
Гранулитовая фация	840–860	– // –

Если породы испытали исключительно региональный метаморфизм, то экзотермический эффект характеризуется близкими значениями температуры его начала устойчивыми для пород на больших площадях. Если, помимо регионального метаморфизма, породы испытали еще интенсивный контактовый метаморфизм, то экзотермический эффект характеризуется разнообразными резкими колебаниями при общем повышенном фоне.

Термогравиметрический анализ углеродистых сланцев зигазино-комаровской свиты проводился на дериватографе Q-1500 (Венгрия) (аналитик Т.И. Черникова, Институт геологии Уфимского научного центра РАН). Нагрев осуществлялся на воздухе от 20 до 1000 °С со скоростью 10 °С/мин. Для анализа отбирались образцы наименее измененных пород за пределами зон интрузивных экзоконтактов и интенсивной тектонической переработки, что позволило исключить их влияние и реконструировать степень именно регионального метаморфизма.

Для сланцев зигазино-комаровской свиты экзотермический эффект происходит в диапазоне 630–730 °С (табл. 3), что соответствует биотит-мусковитовому (фация зеленых сланцев) и близок к ставролит-андалузит-биотитовому уровню метаморфизма (эпидот-амфиболитовая фация) [10] (см. рис. 2, табл. 2).

Следует отметить, что больший интерес представляют не абсолютные цифры, а распределение температур по площади. Построение карты изолиний значений температур экзотермического эффекта (метод интерполяции Kriging) позволяет по результатам термогравиметрического анализа выделить зоны с различной степенью метаморфических преобразований (см. рис. 3).

Причем полученная таким путем граница зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций для сланцев зигазино-комаровской свиты, проведенная по изолинии в 660 °С, вполне согласуется с таковой полученной А.А. Алексеевым [1] при построении карты метаморфической зональности Белорецкого

Температура начала выгорания и содержание органического углерода в сланцах зигазино-комаровской свиты по результатам термического анализа

№ п/п	№ обр.	Δt, °C	C _{орг} , %	№ п/п	№ обр.	Δt, °C	C _{орг} , %
1	От-00	670	1,2	9	8814	725	2,2
2	8815	630	0,8	10	8815	630	0,8
3	8801	690	1,4	11	8816	660	1,7
4	8803/1	710	2,1	12	8820	700	1,4
5	8804	700	0,9	13	8822	700	2,3
6	8806	680	2,0	14	8823	710	3,3
7	8810	680	1,8	15	8824	730	3,0
8	8812/1	700	3,9	16	8825	660	1,3

метаморфического комплекса. Автором граница между амфиболитовой и зеленосланцевой фазией проводилась по изограде граната, а внешняя граница зеленосланцевой – по изограде биотита [1].

Более того, в результате обработки собранного опубликованного и фондового материала по золотоносности углеродистых отложений Белорецкого метаморфического комплекса и его обрамления, а также порядка 200 анализов собственных штучных и бороздовых проб выявилась очень четкая закономерность размещения повышенных содержаний золота, подобная описанной выше в обрамле-

нии Ларинского купола и Суундукского гранитного массива [3; 11]. В частности, проявления Отнурок, Кудашманово, Улу-Елга, Ишля, Кагарманово, Гадыльшино высокие содержания на горе Широкая, хребте Маярдак и все точки с промышленными значениями золота укладываются в область развития пород с зеленосланцевой фазией метаморфизма [12].

Механизм перераспределения благородных металлов детально рассмотрен в экспериментальной работе Л.П. Плюсниной и др. [13]. Метаморфизм углеродистого вещества сопровождается генерацией водно-органического олеофильного флюида-мобилизата, газовых

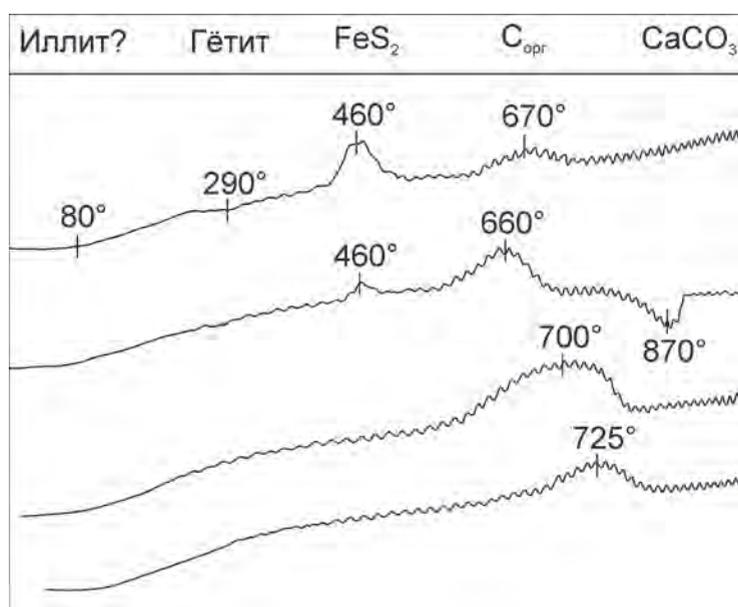


Рис. 2. Характерные термограммы ДТА для углеродистых сланцев зигазино-комаровской свиты

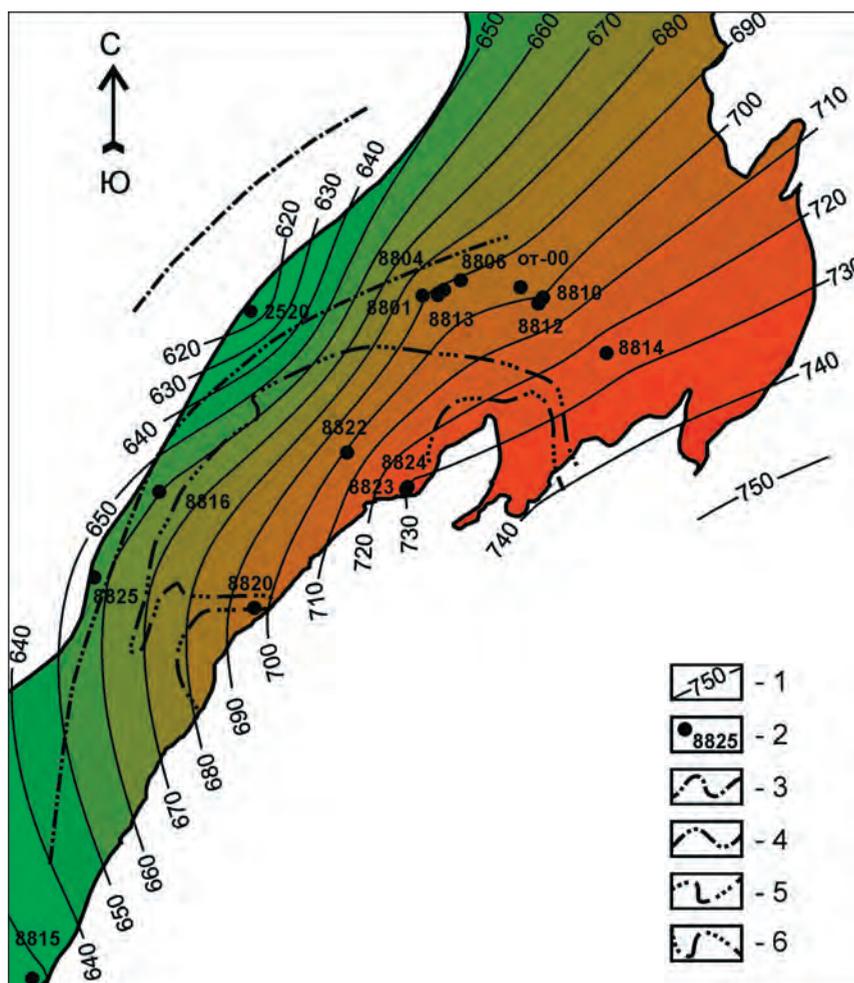


Рис. 3. Карта изолиний значений температур экзотермического эффекта (ДТА) для кремнисто-углеродистых сланцев свиты в пределах Белорецкого метаморфического комплекса (метод интерполяции Kriging): 1 – изолинии и их значение (°С), 2 – точки отбора образцов и их номер; 3–6 – изограды по А.А. Алексееву [1]: 3 – хлоритоида, 4 – биотита, 5 – граната, 6 – омфацита

фаз и твердого керогена. При этом часть благородных металлов мигрируют за пределы вмещающих пород вместе с мобилизатором, а часть концентрируется в оставшемся объеме керогена. Завершается процесс кристаллизации графита по керогену при температуре 500 °С, при этом его сорбционная емкость достигает своего максимума в 2700 г/т и 1000 г/т для Au и Pt соответственно. В самом графите при дегазации образуются поры и пустоты сечением от 200 до 500 мкм, образующие мелкоячеистый пористый каркас. Как следствие, пласты пород с подобным графитом разуплотняются, что повышает их проницаемость для рудоносных растворов, а восстановительная

обстановка способствует рудной минерализации и благоприятствует внедрению металлофулеренов между плоскостями (002).

По данным А.И. Ханчука и др. [14], ранней формой выделения платины являются тонкодисперсные агломераты размером единицы–десятки микрон, содержащие в своем составе углерод и большое количество других элементов. Последующее усиление метаморфизма и, возможно, переотложение ведут к частичному очищению благородных металлов от примесей и формированию пластинчатых и кристаллических форм.

Таким образом, проведенная работа показывает возможность использования до-

статочного дешевого термогравиметрического анализа при прогнозе золотого оруденения в метаморфизованных углеродистых толщах. Золоторудные объекты, имея четкую приуро-

ченность к зеленосланцевой фации [15; 16], в большинстве случаев концентрируются вблизи или почти на границе с амфиболитовой фацией метаморфизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.А. Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. М.: Наука, 1984. 136 с.
2. Алексеев А.А., Ковалев С.Г., Тимофеева Е.А. Белорецкий метаморфический комплекс. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2009. 210 с.
3. Сначёв А.В., Сначёв В.И., Рыкус М.В., Савельев Д.Е., Бажин Е.А., Ардисламов Ф.Р. Геология, петрогеохимия и рудоносность углеродистых отложений Южного Урала. Уфа: ДизайнПресс, 2012. 208 с.
4. Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначев В.И., Жданов А.В., Каримов Т.Р., Айдаров Э.М., Масагутов Р.Х., Арсланова Э.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (3-е поколение). Сер. Уральская. Лист N-40 Уфа. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2013. 512 с. +6 вкл.
5. Сначёв А.В. Геология и петрохимические особенности углеродистых отложений зигазино-комаровской свиты Белорецкого метаморфического купола (Южный Урал) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Пермь: Пермский ГУ, 2015. С. 328–333.
6. Сначёв А.В., Пучков В.Н., Савельев Д.Е., Сначёв В.И. Геология Арамильско-Сухтелинской зоны Урала. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. 176 с.
7. Сидоренко А.В., Сидоренко Св.А. Органическое вещество в докембрийских осадочно-метаморфических породах и некоторые геологические проблемы // Сов. геология. 1971. № 5. С. 3–20.
8. Рыкус М.В., Андреев Н.И., Муркин В.П., Маслов А.В., Сначев В.И. Углеродистые отложения докембрия Южного Урала. Препринт. Уфа: УНЦ РАН, 1993. 40 с.

9. Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розинова Е.Л. Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974. 399 с.
10. Блюман Б.А., Дьяконов Ю.С., Красавина Т.Н., Павлов М.Г. Использование термо- и рентгенографических характеристик графита для определения уровня и типа метаморфизма // Зап. Всесоюз. минералог. об-ва. 1974. Ч. 103, вып. 1. С. 95–103.
11. Сначёв А.В. Петрогеохимическая и палеогеографическая характеристика условий осадконакопления углеродистых отложений области сочленения Магнитогорской и Восточно-Уральской мегазон Южного Урала (широта Суондунского массива) // Геология. Изв. Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2010. № 15. С. 90–95.
12. Сначёв В.И., Сначёв А.В. Закономерности размещения золоторудных проявлений в углеродистых отложениях Белорецкого метаморфического комплекса (Южный Урал) // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. 2014. № 2. С. 79–87.
13. Плюснина Л.П., Лихойдов Г.Г., Кузьмина Т.В. Графитизация и нафторудогенез // Литосфера. 2011. № 5. С. 111–116.
14. Ханчук А.И., Бердников Н.В., Черепанов А.А., Коновалова Н.С., Авдеев Д.В. Первые находки видимых платиноидов в черносланцевых толщах Буреинского массива (Хабаровский край и Еврейская ОА) // Доклады РАН. 2009. Т. 424. № 5. С. 672–675.
15. Сначёв А.В., Рыкус М.В., Сначёв М.В., Романовская М.А. Модель золотообразования в углеродистых сланцах Южного Урала // Вестн. МГУ. Сер. 4: Геология. 2013. № 2. С. 49–57.
16. Сначёв В.И., Демин Ю.И., Романовская М.А., Щулькин В.Е. Тепловой режим становления гранитоидных массивов. Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1989. 117 с.

REFERENCES

1. Alekseev A.A. Rifeysko-vendskiy magmatizm zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [Riphean-Vendian mag-

matism of the western slope of the South Urals]. Moscow, Nauka, 1984. 136 p. (In Russian).

2. Alekseev A.A., Kovalev S.G., Timofeeva E.A. Beloretskiy metamorficheskiy kompleks [The Beloretsk

- metamorphic complex]. Ufa, DizaynPoligrafServis, 2009. 210 p. (In Russian)
3. Snachev A.V., Snachev V.I., Rykus M.V., Saveleyev D.E., Bazhin E.A., Ardislamov F.R. Geologiya, petrogeokhimiya i rudonosnost uglerodistykh otlozheniy Yuzhnogo Urala. Ufa, DizaynPress, 2012. 208 p. (In Russian).
 4. Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu., Snachev V.I., Zhdanov A.V., Karimov T.R., Aydarov E.M., Masagutov R.Kh., Arslanova E.R. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii [State geologic map of the Russian Federation]. Scale 1:1,000,000 (3rd generation). Series Uralian. Sheet N-40 Ufa. St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2013. 512 p. + 6 insets.
 5. Snachev A.V. Geologiya i petrokhimicheskie osobennosti uglerodistykh otlozheniy Zigazino-Komarovskoi svity Beloretskogo metamorficheskogo kupola (Yuzhnyy Ural) [Geology and petrochemical features of carbon deposits in the Zigaza-Komarovo Formation of the Beloretsk metamorphic dome (South Urals)]. Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo [Problems in mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in commemoration of P.N. Chirvinskiy]. Perm, Perm University 2015, pp. 328–333 (In Russian).
 6. Snachev A.V., Puchkov V.N., Saveleyev D.E., Snachev V.I. Geologiya Aramilsko-Sukhtelinskoy zony Urala [Geology of the Aramil-Sukhtelinskiy zone of the Urals]. Ufa, DizaynPoligrafServis, 2006. 176 p. (In Russian).
 7. Sidorenko A.V., Sidorenko S.A. Organicheskoe veshchestvo v dokembriyskikh osadochno-metamorficheskikh porodakh i nekotorye geologicheskie problemy [Organic matter in Precambrian sedimentary metamorphic rocks and some geological problems]. Sovetskaya geologiya – Soviet Geology, 1971, no. 5, pp. 3–20. (In Russian).
 8. Rykus M.V., Andreev N.I., Murkin V.P., Maslov A.V., Snachev V.I. Uglerodistye otlozheniya dokembriya Yuzhnogo Urala [Precambrian carbon deposits of the South Urals]. Preprint. Ufa, UNTs RAN, 1993. 40 p. (In Russian).
 9. Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N., Rozinova E.L. Termicheskiy analiz mineralov i gornyykh porod [Thermal analysis of minerals and rocks]. Leningrad. Nedra, 1974. 399 p. (In Russian).
 10. Blyuman B.A., Dyakonov Yu.S., Krasavina T.N., Pavlov M.G. Ispolzovanie termo- i rentgenograficheskikh kharakteristik grafita dlya opredeleniya urovnya i tipa metamorfizma [The use of thermal and X-ray characteristics of graphite for determining levels and types of metamorphism]. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva – Proceedings of the All-Union Mineralogical Society, 1974, vol. 103, no. 1, pp. 95–103 (In Russian).
 11. Snachev A.V. Petrogeokhimicheskaya i paleogeograficheskaya kharakteristika usloviy osadkonakopleniya uglerodistykh otlozheniy oblasti sochleneniya Magnitogorskoy i Vostochno-Uralskoy megazon Yuzhnogo Urala (shirota Suundukskogo massiva) [Petrogeochemical and paleogeographic characteristics of the carbon depositional environment in the junction zone between the Magnitogorsk and East Ural megazones of the South Urals (latitude of the Suunduk Massif)]. Geologiya. Izvestiia AN RB – Geology. Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, 2010, no. 15, pp. 90–95 (In Russian).
 12. Snachev V.I., Snachev A.V. Zakonomernosti razmeshcheniya zolotorudnykh proyavleniy v uglerodistykh otlozheniyakh Beloretskogo metamorficheskogo kompleksa (Yuzhnyy Ural) [Regularities of gold-ore distribution in carbon deposits of the Beloretsk metamorphic complex (South Urals)]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Voronezh State University, 2014, no. 2, pp. 79–87 (In Russian).
 13. Plyusnina L.P., Likhoidov G.G., Kuzmina T.V. Grafitizatsiya i naftorudogenez [Graphite, naphthene and ore formation]. Litosfera – Lithosphere, 2011, no. 5, pp. 111–116 (In Russian).
 14. Khanchuk A.I., Berdnikov N.V., Cherepanov A.A., Konovalova N.S., Avdeev D.V. Pervye nakhodki vidimyykh platinoidov v chernoslantsevyykh tolshchakh Bureinskogo massiva (Khabarovskiy kray i Evreyskaya AO) [First findings of observable platinumoids in black-schist units of the Bureya Massif (Khabarovsk Krai and the Jewish Autonomous Oblast)]. Doklady RAN – Proceedings of the Russian Academy of Sciences, 2009, vol. 424, no. 5, pp. 672–675 (In Russian).
 15. Snachev A.V., Rykus M.V., Snachev M.V., Romanovskaya M.A. Model zolotoobrazovaniya v uglerodistykh slantsakh Yuzhnogo Urala [The model of ore formation in carbonaceous shales of the South Urals]. Vestnik MGU – Herald of the Moscow State University. Series 4: Geology, 2013, no. 2, pp. 49–57 (In Russian).
 16. Snachev V.I., Demin Y.I., Romanov M.A., Schulkin V.E. Teplovoj rezhim stanovleniya granitoidnykh massivov [Thermal regime of the formation of granitoid massifs]. Ufa: BNC UrO AN SSSR, 1989. 117 p. (In Russian).