

УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА ДОКЕМБРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ИЛЬМЕНОГОРСКО-СЫСЕРТСКОГО АНТИКЛИНОРИЯ

В. И. Сначёв, А. В. Сначёв

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, E-mail: savant@inbox.ru*

Кыштымская ($PR_1k\check{s}$), сайтовская (RF_2st), игишская (RF_2ig) и кундравинская (Vkn) свиты распространены в обрамлении ильменогорского метаморфического комплекса и узкой полосой огибают Чашковский массив гранитов и Еланчиковскую антиформную структуру. Геологические, петрохимические и термобарометрические данные по биотит-гранатовому и амфибол-гранатовому парагенезисам и углеродистым сланцам позволили установить, что черносланцевые отложения вышеперечисленных свит образовались в дистальной глубоководной и удаленной от береговой линии области осадочного бассейна. Они относятся к низкоуглеродистому и углеродистому типам, а также кремнисто-углеродистой формации, имеющей минимальное количество терригенной примеси в своем составе. На рубеже рифея и венда, когда на Южном Урале произошла крупная структурная перестройка, вулканогенно-осадочные породы перечисленных выше свит испытали региональный метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации ($T=470-580^{\circ}C$, $P=2.0-7.2$ кбар, абиссальная зона глубинности). В дальнейшем, в период становления крупных Аргазинского, Кисегачского, Еланчиковского и Чашковского гранитоидных массивов, отложения Ильменогорско-Сысертского антиклинория подверглись зональному контактовому метаморфизму. В зависимости от расстояния до кислых интрузий они испытали преобразование в условиях от фации альмандиновых амфиболитов ($T=750-770^{\circ}C$, $P=8.8-9.0$ кбар) до куммингтонитовых амфиболитов ($T=530-550^{\circ}C$, $P=2.1-3.6$ кбар).

Ключевые слова: Ильменогорско-Сысертский антиклинорий, сайтовская свита, кыштымская свита, кундравинская свита, игишская свита, температура, давление, палеогеография, палеогеодинамика

CONDITIONS OF METAMORPHISM OF THE PRECEMBRIAN SEDIMENTS OF THE ILMEN-SYSERT ANTICLINORIUM

V.I. Snachev, A.V. Snachev

*Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of RAS,
16/2, K. Marx St., Ufa, 450077, Russia, E-mail: savant@inbox.ru*

The Kyshtym ($PR_1k\check{s}$), Saitovo (RF_2st), Igish (RF_2ig), and Kundravi (Vkn) Formations are distributed within the framework of the Ilmen metamorphic complex and envelop the Chashkov granite massif and the Elanchik antiform structure in a narrow strip. Geological, petrochemical, and thermobarometric data on biotite-garnet and amphibole-garnet parageneses and carbonaceous shales made it possible to conclude that the black shale deposits of the above formations were formed in the distal deep-water environment and remote from the coastline area of the sedimentary basin. They belong to the low-carbonaceous and carbonaceous types, as well as the siliceous-carbonaceous formation, which has a minimum amount of terrigenous impurities in its composition. At the boundary between the Riphean and Vendian, when a major structural transformation occurred in the Southern Urals, volcanogenic-sedimentary rocks of the above formations experienced regional metamorphism under conditions of the epidote-amphibolite facies ($T=470-580^{\circ}C$, $P=2.0-7.2$ kbar, abyssal depth zone). Later, during the formation of the large Argazi, Kisegach, Elanchik and Chashkov granitoid massifs, the deposits of the Ilmen-Sysert anticlinorium

Для цитирования: Сначёв В.И., Сначёв А.В. Условия метаморфизма докембрийских отложений Ильменогорско-Сысертского антиклинория // Геологический вестник. 2021. № 2. С. 3–16. DOI: 10.31084/2619-0087/2021-2-1.

For citation: Snachev V.I., Snachev A.V. (2021) Conditions of metamorphism of the precambrian sediments of the Ilmen-Sysert anticlinorium. *Geologicheskii vestnik*. No. 2. P. 3–16. DOI: 10.31084/2619-0087/2021-2-1.

© В.И. Сначёв, А.В. Сначёв, 2021

underwent zonal contact metamorphism. Depending on the distance to acidic intrusions, they underwent transformation under conditions from the facies of almandine amphibolites ($T=750\text{--}770^\circ\text{C}$, $P=8.8\text{--}9.0$ kbar) to cummingtonite amphibolites ($T=530\text{--}550^\circ\text{C}$, $P=2.1\text{--}3.6$ kbar).

Keywords: Imen-Sysert anticlinorium, Saitovo Series, Kyshtym Series, Kundravi Series, Igish Series, temperature, pressure, paleogeography, paleogeodynamics

Введение

Работами сотрудников Ильменского государственного заповедника и Института минералогии (г. Миасс) внесен существенный вклад в изучение стратиграфии, тектоники, магматизма и металлогении Ильменогорско-Сысертского антиклинория. Вместе с тем углеродистые сланцы и базальты, довольно широко представленные среди развитых здесь вулканогенно-осадочных образований, остались либо не изученными, либо информация по ним хранится в фондовых отчетах, хотя именно они могут дать очень важную информацию о палеогеографических, палеогеодинамических и физико-химических условиях накопления осадков, об источниках сноса терригенного материала, о степени преобразованности пород в результате регионального и зонального контактового метаморфизма. В данной статье авторами предпринята попытка внести определенный вклад в уточнение истории формирования черносланцевых и вулканогенных толщ, их типизацию, формационное расчленение, выяснение физико-химических условий метаморфизма.

Методика исследований

Термогравиметрический анализ углеродистых пород проводился на дериватографе Q-1500 (аналитик Т.И. Черникова, ИГ УФИЦ РАН). Нагрев осуществлялся на воздухе от 20 до 1000°C со скоростью $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Для анализа отбирались образцы наименее окварцованных и сульфидизированных пород за пределами зон интрузивных экзоконтактов и интенсивной тектонической переработки, что позволило исключить их влияние и реконструировать степень именно регионального метаморфизма. Силикатный анализ выполнен по стандартной методике в Институте геологии УФИЦ РАН (г. Уфа, аналитик С.А. Ягудина).

Составы амфиболов, биотитов и гранатов, отобранных из пород сайтовской свиты, проанализированы И.А. Блиновым (ИМин УрО РАН, г. Миасс) на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3sbu с энерго-дисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-act (ускоряющее напряжение

20 кВ, эталоны для амфибола — амфибол, для биотита — биотит, для граната — пироп, андрадит и гроссуляр).

Геологическое строение кыштымской, сайтовской, игишской и кундравинской свит

Кыштымская свита ($PR_1 k\dot{s}$) распространена в обрамлении ильменогорского метаморфического комплекса и узкой полосой огибает Чашковский массив гранитов и Еланчиковскую антиформную структуру (рис. 1). Согласно геологосъемочным работам, проведенным авторами данной статьи и сотрудниками ОАО «Челябинскгеосъемка» в 1997–2001 гг. (лист N-41-VII, Миасс, М 1:200000) [Петров и др., 2003], в состав толщи входят: амфиболиты (в том числе гранатовые), гнейсы (биотитовые, гранат-биотитовые, амфибол-биотитовые), пироксен-плагиоклазовые кристаллосланцы, гранат-ставролит-биотитовые сланцы, слюдяные и графит-слюдяные кварциты и, очень редко, мраморы. Она интенсивно смята в мелкие складки, но в целом имеет моноклиальное восточное падение на меридиональном отрезке и южное падение на замыкании структуры на юге, подчиняясь форме Еланчиковской антиформной структуры и Чашковского гранитного массива. Верхняя и нижняя границы толщи в пределах района в большинстве случаев тектонические, но в разрезе по перемычке между озерами Б. Еланчик и Кундравинским вскрыт нормальный контакт между мусковит-биотитовыми гнейсами еланчиковской и кварцитами кыштымской толщ.

Усредненный разрез рассматриваемой толщи состоит из трех пачек. Первая из них, мощностью 145 м, состоит из амфиболитов, составляющих 53%, гнейсов — 34%, кварцитов — 3%, мраморов — 10%; вторая (существенно кварцитосланцевая), мощностью 380 м, представлена биотитовыми и двуслюдянными сланцами, иногда с гранатом и графитом, составляющими 63%, слюдяными и графит-слюдяными кварцитами — 32% и амфиболитами — 5%; третья (сланцевая) более грубослоистая, мощностью около 450 м, в ней амфиболиты

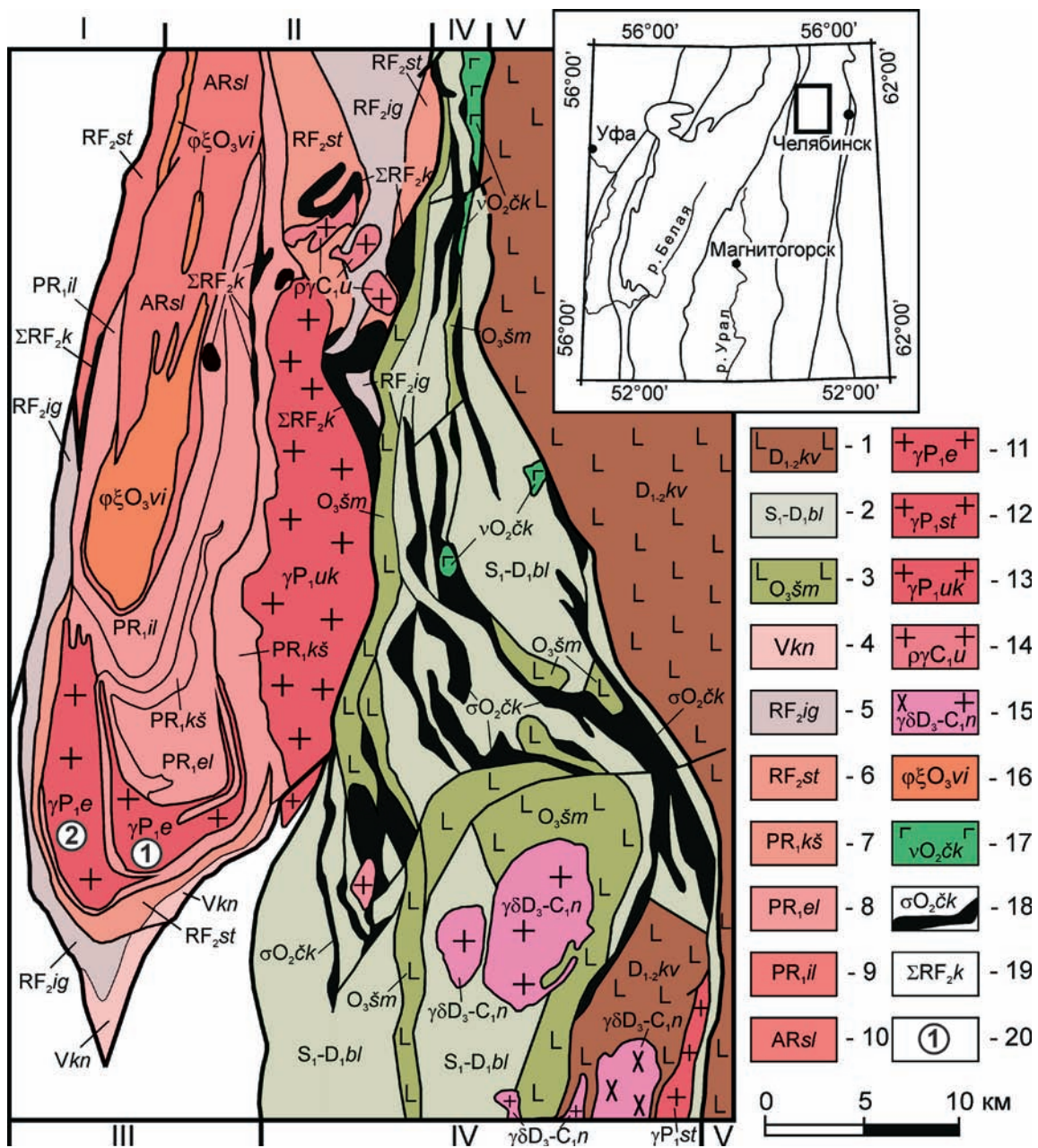


Рис. 1. Геологическая карта Ильменогорско-Сысертского мегантиклинория и восточного его обрамления (составлена по материалам В.И. Петрова)

Условные обозначения: 1 — кулеувская толща (лавы и лавобрекчии базальтов, реже андезибазальтов); 2 — булатовская толща (сланцы углеродисто-кремнистые, углеродисто-глинисто-кремнистые); 3 — шеметовская толща (базальты, андезибазальты); 4 — кундравинская свита (метагравелиты, метапесчаники с прослоями мраморизованных известняков); 5 — игишская свита (кварциты графитистые, графитистые кварцито-сланцы); 6 — сайтовская свита (плагосланцы амфиболовые, гранат-биотит-амфиболовые); 7 — кыштымская толща (амфиболиты, гнейсы гранат-биотитовые); 8 — еланчиковская толща (гнейсы биотитовые, амфибол-биотитовые); 9 — ильменогорская толща (амфиболиты, плагигнейсы биотитовые); 10 — селянкинская свита (плагигнейсы биотитовые, гранат-биотитовые); 11 — еланчиковский комплекс гранитовый; 12 — степнинский комплекс монцодиорит-граносиенит-гранитовый; 13 — увильдинско-кисегачский комплекс монцодиорит-граносиенит-гранитовый; 14 — уразбаевский комплекс тоналит-плагигранитовый; 15 — неплюевский комплекс диорит-гранодиорит-гранитовый; 16 — вишневогорско-ильменогорский комплекс карбонатит-миаскитовый; 17 — чебаркульско-казбаевский комплекс серпентинизированных дунитов, гарцбургитов; 18 — чебаркульско-казбаевский комплекс габбровый; 19 — каганский комплекс метаморфизованных ультрамафитов и габброидов; 20 — гранитоидные массивы: 1 — Еланчиковский, 2 — Чашковский. Римскими цифрами на верхней и нижней части рамки карты показаны зоны: I — Вознесенско-Присакмарская и Западномагнитогорская, II — Ильменогорско-Сысертская, III — Уйско-Новооренбургская, IV — Арамилско-Сухтелинская, V — Касаргино-Рефтинская.

Fig. 1. Geological map of the Ilmenk-Sysert anticlinorium and its eastern framing (compiled based on the materials of V.I. Petrov)

Legend: 1 — Kuluyevo sequence (lavas and lavas-breccias of basalts, less often basaltic andesites); 2 — Bulatovo series (carbonaceous-siliceous shales, carbonaceous-argillaceous-siliceous shales); 3 — Shemetovo sequence (basalts, basaltic andesites); 4 — Kundravi Series (metagravelites, metasandstones with interlayers of marbled limestones); 5 — Igish Series (graphite quartzite, graphite quartzite-schist); 6 — Saitovo Series (plagioclites amphibole, garnet-biotite-amphibole); 7 — Kyshtym Series (amphibolites, garnet-biotite gneisses); 8 — Elanchik sequence (biotite gneisses, amphibole-biotite); 9 — Ilmen sequence (amphibolites, biotite plagiogneisses); 10 — Selyankino Series (biotite plagiogneisses, garnet-biotite); 11 — Elanchik granite complex; 12 — Stepninsky complex monzodiorite-granosyenite-granite; 13 — Uvilda-Kisegach complex monzodiorite-granosyenite-granite; 14 — Urazbayevo complex tonalite-plagiogranite; 15 — Neplyuevo diorite-granodiorite-granite complex; 16 — Vishnevogorsk-Ilmen complex carbonatite-miaskite; 17 — Chebarkul-Kazbaevo complex of serpentinized dunites, harzburgites; 18 — gabbro Chebarkul-Kazbaevo complex; 19 — Kagan complex of metamorphosed ultramafic rocks and gabbroids; 20 — Granitoid massifs: 1 — Elanchik, 2 — Chashkovsky. *Zones are shown in Roman numerals at the top and bottom of the map frame:* I — Voznesenka-Prisakmara and Western Magnitogorsk, II — Ilmen-Sysert, III — Uysko-Novooenburgsk, IV — Aramil'sk-Sukhtelinsk, V — Kasargi-Reftinsk.

составляют 31%, гнейсы и сланцы — 62% и кварциты — 7%.

Условия метаморфизма пород толщи отвечают фации ставролитовых сланцев или эпидотовых амфиболитов. Об этом свидетельствуют редкие находки ставролитовых сланцев в составе толщи. Раннепротерозойский возраст толщи принят в соответствии с Южно-Уральской серийной легендой и в настоящее время не охарактеризован инструментальными методами.

Саитовская свита (RF_2st) распространена в западном и южном обрамлении Ильменогорско-Сысертского антиклинория (см. рис. 1). Согласно геологосъемочным работам [Петров и др., 2003] она имеет двучленное строение.

Состав нижнесаитовской подсвиты довольно однообразен и связан с резким преобладанием амфиболовых апобазальтовых плагиосланцев по сравнению с редко встречаемыми биотитовыми и гранат-биотитовыми сланцами и кварцитами. Породы свиты на всей площади ее распространения согласно налегают на сланцы аракульской свиты, либо тектонически контактируют с более древними образованиями. Мощность подсвиты в наиболее полных разрезах достигает 760 м. Метаморфизм ее образований отвечает условиям эпидот-амфиболитовой фации.

Верхнесаитовская подсвита занимает промежуточное положение между нижнесаитовской подсвитой и игишской свитой. Кроме амфиболовых плагиосланцев, которые не отличаются от нижнесаитовских, здесь присутствуют гранат-биотит-амфиболовые, биотит-амфиболовые, гранат-биотитовые и биотитовые плагиосланцы, а в средней и верхней частях разреза устанавливаются прослойки графитистых кварцитов.

Амфиболовые сланцы аналогичны сланцам нижнесаитовской подсвиты, а биотитовые и гранат-биотитовые сланцы сходны по облику с аракуль-

скими. На диаграмме А.А. Предовского [Петров и др., 2003] фигуративные точки амфиболовых сланцев попадают в поле базальтов. Среднерифейский возраст отложений свиты принят в соответствии с Южно-Уральской стратиграфической схемой.

Игишская свита (RF_2ig) является маркирующей, так как представлена однообразными графитистыми темно-серыми до черных кварцитами. Породы свиты отвечают положительным формам рельефа, слагая Игишский хребет и возвышенности к югу и востоку от оз. Аргазы [Петров и др., 2003]. Кроме кварцитов в составе свиты в небольшом объеме встречаются прослойки биотитовых, гранат-биотитовых, ставролит-гранат-биотитовых, реже амфибол-биотитовых, гранат-амфибол-биотитовых сланцев. Графитистые кварциты содержат в большом количестве светло-коричневый и оранжевый биотит, серицит, гранат, который в протолочках имеет черный цвет от углистых включений. В некоторых разновидностях, обогащенных до проявления метаморфизма глинистым или гидрослюдисто-глинистым материалом, встречаются кроме граната порфиروبласты ставролита, мусковита, а на хребте Игиш в породах отмечено редкое проявление кианита. Характерной особенностью игишских кварцитов является присутствие включений линзовидной и обломковидной формы черных тонкозернистых фосфоритов [Рыкус, Сначёв, 2000].

Контакт между игишскими кварцитами и верхнесаитовскими сланцами перебурен рядом скважин и имеет в большинстве случаев согласный характер, но местами подорван и между породами свит вклиниваются маломощные тела метаморфизованных ультрамафитов (антигоритовых серпентинитов и тальк-карбонатных пород). Мощность свиты по данным бурения оценивается в 400–500 м. Среднерифейский возраст описываемой свиты принят в соответствии со Стратиграфическими схемами

Урала, 1993 г. [Петров и др., 2003; Князев и др., 2013].

Кундравинская свита (*Vkn*) картируется в пределах южной части Ильменогорско-Сысертского мегантиклинория на замыкании хребта Игиш, к северо-западу от с. Кундравинского (см. рис. 1). По данным геологосъемочных работ [Петров и др., 2003] свита сложена метапесчаниками, метаалевролитами, содержащими редкие маломощные, измеряемые первыми сантиметрами прослои мраморизованных песчаных известняков. Песчаники и алевролиты превращены в бластосаммитовые, бластоалевритовые сланцы, в составе которых преобладают разновидности, содержащие амфибол: амфиболовые, биотит-амфиболовые, гранат-биотит-амфиболовые, реже встречаются биотитовые и гранат-биотитовые.

Образования свиты залегают выше графитистых кварцитов игишской свиты. Контакт, по всей вероятности, тектонический. В составе обломочного материала песчаников нередко встречаются обломки графитистых кварцитов игишской свиты. Основной особенностью свиты является хорошо выраженная слоистость и часто наблюдаемое ритмическое ее строение. Мощность свиты оценивается в 500 м.

В бластосаммитовых сланцах кундравинской свиты обнаружены микрофоссилии *Protosphaeridium laccatum* Tim и *Leiosphaeridia* sp., а также большое количество серых водорослевых образований, характерных, по мнению В.Г. Кузнецовой, для верхнепротерозойско-вендских отложений Алтае-Саянской области [Петров и др., 2003]. В соответствии со Стратиграфической схемой Урала 1995 г. возраст свиты принят вендским.

Результаты исследований и их обсуждение

Обратимся к табл. 1, где собраны результаты силикатного анализа черносланцевых пород сайтовской, игишской и кыштымской свит. Хорошо видно, что по главным компонентам они не отличаются друг от друга и имеют довольно стабильные их значения: $\text{SiO}_2 = 81.19\text{--}95.28$; $77.05\text{--}96.52$ и $74.21\text{--}94.26\%$ (соответственно в сайтовских, игишских и кыштымских образованиях), $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.40\text{--}5.12$; $0.40\text{--}6.67$ и $0.80\text{--}9.29\%$, $\text{CaO} = 0.07\text{--}2.21$; $0.10\text{--}2.57$ и $0.11\text{--}3.10\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 0.18\text{--}1.60$; $0.27\text{--}2.18$ и $0.28\text{--}3.72\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.04\text{--}1.23$; $0.02\text{--}1.03$ и $0.06\text{--}1.23\%$. На диаграмме А–S–С О.В. Горбачёва и Н.А. Созинова [1985] (рис. 2) все 30 проб компактно укладываются в правую половину поля кремнисто-

углеродистой формации. Учитывая обратнопропорциональную зависимость коэффициента S с долей терригенной примеси в осадках, которая, в свою очередь, связана с глубиной бассейна осадконакопления, можно сделать однозначный вывод об отложении рассматриваемых пород в пределах наиболее глубоководной области бассейна. Отсутствие в разрезах вышеперечисленных свит карбонатных пород, а также очень незначительная величина

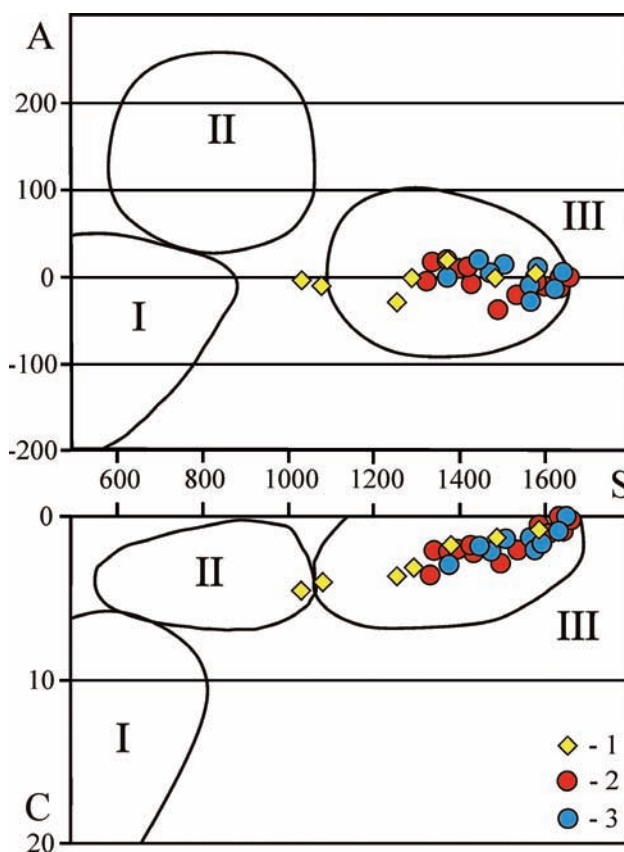


Рис. 2. Типизация углеродистых пород кыштымской, игишской и сайтовской свит с помощью диаграммы О.В. Горбачёва, Н.А. Созинова [1985]

Условные обозначения: 1 — кыштымская свита, 2 — игишская свита, 3 — сайтовская свита. Поля формаций: I — карбонатно-углеродистая, II — терригенно-углеродистая, III — кремнисто-углеродистая. Параметры: $A = (\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})) \times 1000$ и $S = (\text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{CaO} + \text{MgO})) \times 1000$ выражены в молекулярных количествах, параметр $C = (\text{CaO} + \text{MgO})$ — в массовых долях оксидов.

Fig. 2. Typification of carbonaceous rocks of the Kyshtym, Igish and Saitovo Series using the diagram of O.V. Gorbachev, N.A. Sozinov [1985]

Legend: 1 — Kyshtym Series, 2 — Igish Series, 3 — Saitovo Series. Formation fields: I — carbonate-carbonaceous, II — terrigenous-carbonaceous, III — siliceous-carbonaceous. Parameters: $A = (\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})) \times 1000$ and $S = (\text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{CaO} + \text{MgO})) \times 1000$ are expressed in molecular amounts, parameter $C = (\text{CaO} + \text{MgO})$ — in mass fractions of oxides.

Таблица 1. Химический состав углеродистых пород сайтовской, игишской и кыштымской свит
Table 1. Chemical composition of carbonaceous rocks of the Saitovo, Igish and Kyshtym Series

№ п/п	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ппп	Сумма
1	88.00	0.27	4.40	1.20	1.00	0.02	1.00	0.80	0.27	0.50	0.40	2.90	99.76
2	92.00	0.06	1.00	1.20	1.07	–	0.50	0.80	0.13	0.27	–	2.30	99.89
3	94.00	0.01	0.40	1.00		–	0.30	0.50	0.27	0.30	–	2.48	99.29
4	81.19	0.33	5.12	2.53	0.57	–	0.74	2.21	0.17	0.65	1.23	5.24	99.99
5	85.70	0.20	3.87	1.14	0.53	–	0.77	1.35	0.20	0.70	0.64	4.24	99.22
6	88.67	0.06	1.73	0.07	0.50	–	0.34	1.70	0.27	0.75	0.66	4.50	99.19
7	87.54	0.20	4.01	0.35	0.57	–	0.80	0.57	0.10	1.50	0.20	3.98	99.82
8	88.40	0.13	2.24	0.04	0.44	–	1.40	0.28	0.10	0.85	0.30	5.46	99.64
9	95.28	0.04	0.72	0.02	0.38	0.02	0.02	0.07	0.07	0.11	0.04	1.14	99.91
10	96.52	0.03	0.58	0.11	0.37	0.04	0.02	0.10	0.08	0.19	0.24	1.98	99.93
11	91.00	0.01	1.90	1.00	–	0.02	0.40	0.20	0.54	1.00		3.21	99.31
12	93.00	0.01	0.40	1.00	–	–	1.40	0.70	0.30	0.54	1.03	1.52	99.92
13	77.05	0.33	6.67	0.96	3.53	0.05	0.76	1.38	0.40	2.00	0.62	6.52	100.3
14	79.30	0.28	5.75	0.24	1.91	0.06	1.67	1.89	0.53	1.65	0.69	4.64	98.61
15	80.40	0.18	5.00	1.25	2.52	0.08	0.19	2.00	0.87	0.60	0.51	6.82	100.4
16	81.65	0.27	5.95	0.39	2.69	0.08	0.38	1.66	0.66	1.03	0.32	5.04	100.1
17	87.08	0.25	4.60	0.21	2.77	0.15	1.96	0.28	0.80	0.82	0.07	0.60	99.65
18	87.50	0.10	2.21	0.07	1.61	0.03	0.34	2.57	0.17	0.76	0.57	3.44	99.30
19	87.96	0.22	3.61	0.15	2.29	0.22	1.57	0.28	0.88	0.72	0.05	0.72	98.67
20	92.06	–	2.02	0.15	0.53	–	0.34	0.71	0.22	0.41	0.03	2.72	99.18
21	93.60	–	0.67	0.10	0.46	–	0.17	0.57	0.23	0.42	0.02	2.74	98.99
22	94.96	–	0.80	0.05	0.50	–	0.24	0.71	0.21	0.34	0.15	1.20	99.11
23	95.84	0.04	0.82	0.35	0.57	–	0.05	0.10	0.08	0.27	0.02	1.78	99.84
24	74.21	0.51	9.18	1.06	1.06	0.07	1.87	2.96	2.12	1.60	1.23	3.48	99.31
25	75.03	0.51	9.29	1.41	3.32	0.05	2.16	3.00	1.82	1.79	0.31	1.80	100.3
26	81.01	0.24	5.50	0.47	0.88	0.07	0.94	3.10	1.00	0.92	1.08	4.30	99.51
27	81.98	0.36	4.98	0.84	1.06	0.03	1.58	2.00	1.00	0.65	0.55	4.12	99.15
28	87.90	0.26	4.98	0.67	1.20	0.10	1.24	0.42	0.18	1.78	0.06	1.44	100.1
29	89.90	0.12	2.64	0.01	1.23	0.02	0.05	1.26	0.07	0.68	0.42	0.50	99.61
30	94.26	0.07	0.80	0.11	0.86	0.01	0.30	0.11	0.15	0.13	0.44	2.20	99.42

Примечание: 1–9 — сайтовская свита, 10–23 — игишская свита, 24–30 — кыштымская свиты; 1–3, 10–12 — собственные данные; 4–9, 13–30 — заимствованы из работы В.И. Петрова и др. [2003].

Note: 1–9 — Saitovo Series, 10–23 — Igish Series, 24–30 — Kyshtym Series; 1–3, 10–12 — own data; 4–9, 13–30 — borrowed from the monograph of V.I. Petrov et al. [2003].

коэффициента $C = CaO + MgO$ (0.09–1.57%) подтверждают данный вывод.

Нами было проведено определение содержания органического углерода в породах сайтовской, игишской и кыштымской свит термическим методом. Для первой из них значения $C_{орг}$ составили 0.5–1.9% для второй — 1.4–3.6% (табл. 2), для третьей — 0.9–3.5% [Сначёв, Сначёв, 2019], что соответствует низкоуглеродистому и углеродистому типам [Крупнин и др., 1993; Юдович, Кетрис, 2015].

Кроме $C_{орг}$ термический анализ позволил оценить и степень регионального метаморфизма отло-

жений сайтовской и игишской свит (см. табл. 2) [Buseck, Beysac, 2014]. Температура начала экзотермического эффекта в них составила 580–590 и 580–600°C, а температура, полученная по максимуму графиков термограмм — 700–770 и 720–770°C. Подобные значения температур, по данным Б.А. Блюмана и др. [1974], указывают на эпидот-амфиболитовую фацию метаморфизма пород. Примечательно, что все данные пробы на диаграмме термической устойчивости углеродистых веществ В.И. Силаева и др. [2012] попадают в поле высших керитов, антраксолитов, шунгитов.

Таблица 2. Результаты термического анализа углеродистых пород сайтовской и игишской свит
Table 2. Results of thermal analysis of carbonaceous rocks of the Saitovo and Igish Series

№ п/п	№ пробы	Температура начала эффекта, (°C)	Температура максимума эффекта, (°C)	Содержание $C_{орг}$
1	ИГ-56	590	700	1.4
2	ИГ-96	590	740	1.9
3	ИГ-90	580	770	0.5
4	ИГ-57	580	720	3.6
5	ИГ-58	600	770	1.4
6	ИГ-91	580	760	1.5

Примечание: 1–3 — сайтовская свита, 4–6 — игишская свита.

Note: 1–3 — Saitovo Series, 4–6 — Igish Series.

Реконструкция P - T условий метаморфизма пород кундравинской, игишской, сайтовской и кыштымской свит на основе изучения гранат-биотитовой и амфибол-гранатовой ассоциаций, широко развитых в амфиболитовых и слюдяных плагиосланцах обрамления Ильменогорско-Сысертского антиклинория, является основной задачей настоящей статьи. Составы минералов, отобранные из пород перечисленных свит (табл. 3, 4), проанализированы на растровом электронном микроскопе. Их формулы рассчитывались по известной методике И.Д. Борнеман-Старынкевич [1964], а затем с помощью диаграммы фазового соответствия магнезиальностей парагенезисов биотит–гранат и амфибол–гранат [Перчук, Рябчиков, 1976; Термо- и барометрия..., 1977] получены температуры, давление и фации метаморфизма пород. Следует отметить, что составы гранатов (альмандинового ряда) кундравинской и сайтовской свит почти ничем не отличаются друг от друга. Однако из табл. 3 хорошо видно, что гранаты кыштымской свиты имеют другой состав и относятся к альмандин-спессартиновому ряду.

Обратимся к рис. 3, на который вынесены точки составов девяти пар биотита и граната из пород кундравинской и кыштымской свит. Хорошо видно, что все они образуют три обособленных группы, первая из которых имеет температуру метаморфизма 530–550°C и принадлежит образцам сланцев с номерами 1–3 (табл. 3), вторая, образованная образцами с № 4–6, охватывает интервал температур в 470–500°C (кундравинская свита), а третья (см. рис. 3), которая включает образцы № 7–9 (кыштымская свита) — 470–500°C. Следует отметить, что пробы № 1–3 отобраны непосредственно из коренного обнажения кундравинской

свиты, а пробы № 4–6 — из керна глубокой скважины ИС-42/320, расположенной в 4 км восточнее и вскрывшей углеродистые сланцы булатовской толщи (S_1 – D_1 bl), основные эффузивы шеметовской (O_3 sm) и преимущественно осадочные метаморфиты

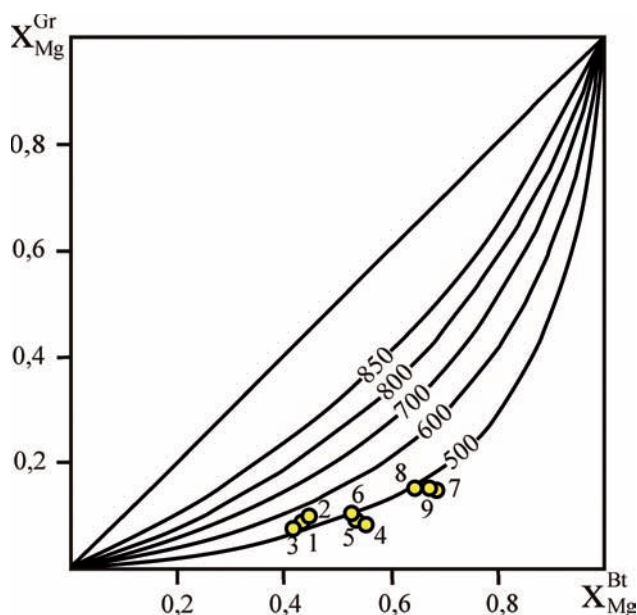


Рис. 3. Диаграмма фазового соответствия $X_{Mg}^{Gr} - X_{Mg}^{Bi}$ в породах кундравинской и кыштымской свит [Перчук, Рябчиков, 1976]

Примечание: кружочки — биотит-гранатовые пары (см. табл. 3). 500–800 — изограды температур образования гранат-биотитовой ассоциации, °C. $X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe+Mn)$ значения мольных долей компонентов.

Fig. 3. Diagram of the phase correspondence $X_{Mg}^{Gr} - X_{Mg}^{Bi}$ in the rocks of the Kundravi and Kyshtym Series [Perchuk, Ryabchikov, 1976]

Note: the circles are biotite-garnet pairs (see table 3). 500–800 — isograds of temperatures of garnet-biotite association formation, °C. $X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe+Mn)$ values of molar fractions of components.

Таблица 3. Состав и формулы биотита (Bi) и граната (Gr)
из пород кундравинской и кыштымской свит (мас. %)

Table 3. Composition and formulas of biotite (Bi) and garnet (Gr)
from rocks of the Kundravi and Kyshtym Series (wt. %)

Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	X _{Mg} ^{Bi,Gr}
Bi-1	37.43	1.06	19.06	22.13	–	–	9.51	0.29	8.35	97.82	0.43
Bi-2	37.00	1.99	17.75	22.05	–	–	9.51	0.25	8.52	97.07	0.44
Bi-3	37.09	1.73	18.51	23.01	–	–	9.33	0.19	8.40	98.25	0.42
Bi-4	38.82	1.51	20.64	17.13	–	–	11.66	0.37	8.39	98.52	0.55
Bi-5	38.25	1.74	20.18	17.59	–	–	11.75	0.32	8.27	98.10	0.54
Bi-6	37.72	1.74	20.20	17.59	–	–	11.17	0.27	8.44	97.13	0.53
Gr-1	37.07	–	21.50	31.29	2.62	4.97	1.77	–	–	99.21	0.08
Gr-2	37.32	–	21.54	32.32	2.40	5.01	1.87	–	–	100.46	0.09
Gr-3	37.18	–	21.45	28.57	5.45	5.37	1.40	–	–	99.41	0.07
Gr-4	37.01	–	21.36	31.58	2.72	5.12	1.67	–	–	99.45	0.08
Gr-5	37.48	–	21.34	31.76	3.16	5.09	1.82	–	–	100.66	0.09
Gr-6	37.29	–	21.50	33.09	1.11	4.90	1.98	–	–	99.86	0.10
Bi-7	39.44	3.17	19.15	11.73	0.68	–	14.35	0.14	9.39	98.04	0.68
Bi-8	39.33	2.96	18.49	13.27	0.73	–	13.89	0.12	9.08	97.86	0.64
Bi-9	39.51	3.37	18.13	12.12	0.69	–	14.33	–	9.50	98.17	0.67
Gr-7	37.32	–	21.40	16.18	19.53	1.91	3.29	–	–	99.64	0.14
Gr-8	37.53	–	21.55	16.79	18.76	1.97	3.52	–	–	100.11	0.15
Gr-9	37.67	–	21.18	17.12	19.27	2.06	3.54	–	–	100.84	0.15
Bi-1	$(K_{0.80}Na_{0.04})_{0.84}(Mg_{1.06}Fe_{1.39}Ti_{0.06}Al_{0.49})_3(Si_{2.81}Al_{1.19})_4O_{10}[O_{0.26}(OH)_{1.74}]_2$										
Bi-2	$(K_{0.83}Na_{0.04})_{0.87}(Mg_{1.08}Fe_{1.40}Ti_{0.11}Al_{0.41})_3(Si_{2.82}Al_{1.18})_4O_{10}[O_{0.32}(OH)_{1.68}]_2$										
Bi-3	$(K_{0.80}Na_{0.03})_{0.83}(Mg_{1.04}Fe_{1.44}Ti_{0.10}Al_{0.41})_3(Si_{2.78}Al_{1.22})_4O_{10}[O_{0.20}(OH)_{1.80}]_2$										
Bi-4	$(K_{0.78}Na_{0.05})_{0.83}(Mg_{1.27}Fe_{1.04}Ti_{0.08}Al_{0.60})_3(Si_{2.83}Al_{1.17})_4O_{10}[O_{0.40}(OH)_{1.60}]_2$										
Bi-5	$(K_{0.77}Na_{0.05})_{0.82}(Mg_{1.28}Fe_{1.08}Ti_{0.10}Al_{0.54})_3(Si_{2.80}Al_{1.20})_4O_{10}[O_{0.36}(OH)_{1.64}]_2$										
Bi-6	$(K_{0.80}Na_{0.04})_{0.84}(Mg_{1.24}Fe_{1.09}Ti_{0.10}Al_{0.58})_3(Si_{2.81}Al_{1.19})_4O_{10}[O_{0.45}(OH)_{1.55}]_2$										
Gr-1	$(Ca_{0.43}Fe_{2.12}Mg_{0.21}Mn_{0.18}Al_{0.05})_3Al_2Si_3O_{12}$										
Gr-2	$(Ca_{0.43}Fe_{2.16}Mg_{0.22}Mn_{0.16}Al_{0.02})_3Al_2(Si_{2.99}Al_{0.01})_3O_{12}$										
Gr-3	$(Ca_{0.47}Fe_{1.93}Mg_{0.17}Mn_{0.37}Al_{0.05})_3Al_2Si_3O_{12}$										
Gr-4	$(Ca_{0.44}Fe_{2.13}Mg_{0.20}Mn_{0.19}Al_{0.04})_3Al_2Si_3O_{12}$										
Gr-5	$(Ca_{0.44}Fe_{2.12}Mg_{0.22}Mn_{0.21})_3Al_2Si_3O_{12}$										
Gr-6	$(Ca_{0.42}Fe_{2.22}Mg_{0.24}Mn_{0.08}Al_{0.04})_3Al_2Si_3O_{12}$										
Bi-7	$(K_{0.87}Na_{0.02})_{0.89}(Mg_{1.56}Fe_{0.71}Mn_{0.04}Ti_{0.17}Al_{0.51})_3(Si_{2.87}Al_{1.13})_4O_{10}[O_{0.59}(OH)_{1.41}]_2$										
Bi-8	$(K_{0.85}Na_{0.02})_{0.87}(Mg_{1.51}Fe_{0.81}Mn_{0.05}Ti_{0.16}Al_{0.47})_3(Si_{2.88}Al_{1.12})_4O_{10}[O_{0.54}(OH)_{1.46}]_2$										
Bi-9	$(K_{0.89}Na_{0.00})_{0.89}(Mg_{1.57}Fe_{0.74}Mn_{0.04}Ti_{0.19}Al_{0.47})_3(Si_{2.90}Al_{1.10})_4O_{10}[O_{0.66}(OH)_{1.34}]_2$										
Gr-7	$(Ca_{0.17}Mg_{0.39}Fe_{1.09}Mn_{1.33})_{2.98}Al_{2.01}Si_3O_{12}$										
Gr-8	$(Ca_{0.17}Mg_{0.42}Fe_{1.12}Mn_{1.27})_{2.98}Al_{2.02}Si_3O_{12}$										
Gr-9	$(Ca_{0.18}Mg_{0.42}Fe_{1.11}Mn_{1.30})_{3.0}(Al_{1.97}Fe_{0.03})_3(Si_{2.99}Al_{0.01})_3O_{12}$										

Примечание: кундравинская свита: Bi-1–Bi-6 — биотиты; Gr-1–Gr-6 — гранаты; кыштымская свита: Bi-7–Bi-9 — биотиты; Gr-7–Gr-9 — гранаты.

Note: Kundravi Series: Bi-1–Bi-6 — biotites; Gr-1–Gr-6 — garnets; Kyshtym Series: Bi-7–Bi-9 — biotites; Gr-7–Gr-9 — garnets.

кундравинской свиты (*Vkn*). Обе точки находятся приблизительно на одном и том же расстоянии от гранитоидов Чашковско-Еланчиковского мигматитового купола. Показатели давления, рассчитанные по известной температуре и коэффициенту $\ln K$,

где $K = X_{Mg}^{Gr} / X_{Mg}^{Bi, Amf}$ [Термо- и барометрия..., 1977], для образцов № 1–3 составили 2.1–3.6 кбар, для проб № 4–6 — 1.9–4.2 кбар (кундравинская свита), а для проб № 7–9 (кыштымская свита) — 6.0–6.3 кбар (рис. 4). Подобные величины давления

Таблица 4. Состав и формулы амфибола (Amf) и граната (Gr) из пород сайтовской свиты (мас. %)

Table 4. Composition and formulas of amphibole (Amf) and garnet (Gr) from the rocks of the Saitovo Series (wt. %)

Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	X _{Mg} ^{Bi,Gr}
Amf –10	43.65	0.79	14.61	18.33	–	10.66	8.69	1.32	0.33	98.37	0.46
Amf –11	43.45	0.92	15.60	17.60	–	10.49	8.56	1.37	0.42	98.41	0.46
Amf –12	43.55	0.75	15.18	17.12	–	10.74	9.10	1.39	0.41	98.26	0.49
Gr–10	37.95	0.30	21.38	30.94	0.67	4.30	4.68	–	–	100.2	0.21
Gr–11	37.71	0.28	21.43	30.57	0.91	4.52	4.32	–	–	99.74	0.20
Gr–12	37.65	0.18	21.24	30.70	0.73	4.21	4.70	–	–	99.41	0.21
Amf –10 – (Ca _{1.66} Na _{0.37} K _{0.06}) _{2.09} (Fe _{2.22} Mg _{1.88} Ti _{0.09} Al _{0.82}) ₅ (Si _{6.33} Al _{1.67}) ₈ O ₂₂ [O _{0.10} (OH) _{1.90}] ₂											
Amf –11 – (Ca _{1.62} Na _{0.38} K _{0.08}) _{2.08} (Fe _{2.12} Mg _{1.84} Ti _{0.10} Al _{0.93}) ₅ (Si _{6.28} Al _{1.72}) ₈ O ₂₂ [O _{0.09} (OH) _{1.91}] ₂											
Amf –12 – (Ca _{1.67} Na _{0.39} K _{0.08}) _{2.14} (Fe _{2.07} Mg _{1.96} Ti _{0.08} Al _{0.88}) ₅ (Si _{6.30} Al _{1.70}) ₈ O ₂₂ [O _{0.13} (OH) _{1.87}] ₂											
Gr–10 – (Ca _{0.36} Fe _{2.03} Mg _{0.55} Mn _{0.04} Ti _{0.02}) ₃ (Al _{1.99} Fe _{0.01}) ₂ Si ₃ O ₁₂											
Gr–11 – (Ca _{0.38} Fe _{2.03} Mg _{0.51} Mn _{0.06} Ti _{0.02}) ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂											
Gr–12 – (Ca _{0.36} Fe _{2.03} Mg _{0.56} Mn _{0.05} Ti _{0.01}) ₃ (Al _{1.99} Fe _{0.01}) ₂ Si ₃ O ₁₂											

характерны для абиссальной зоны глубинности (7–15 км). Положение гранат-биотитовых пород кундравинской и кыштымской свит на петрогенетической диаграмме [Термо- и барометрия..., 1977] (рис. 5) указывает на то, что рассматриваемые породы были преобразованы на уровне фации куммингтонитовых (точки 1–5) или эпидотовых (точки 6–9) амфиболитов. Для трех пар граната и амфибола сайтовской свиты температура преобразования, судя по гранат-амфиболовому термобарометру (рис. 6), составляла 550–580°C. Значения по давлению для проб № 10–12 соответствуют 6.8–7.2 кбар (рис. 7), что соответствует эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма (рис. 5). Связано это с метаморфизмом вулканогенно-осадочных пород кундравинской, кыштымской и сайтовской свит в период формирования Чашковско-Еланчиковского купола. По данным различных исследователей произошло это либо в раннепермское [Петров и др., 2003], либо среднеордовикское [Пермяков, 2000] время.

Определенный интерес для реконструкции палеогеодинамических условий формирования пород сайтовской, кыштымской и кундравинской свит представляет рассмотрение петрохимических особенностей амфиболитов [Савельев и др., 2006], образование которых связано с региональным и контактовым метаморфизмом базальтов (среди отложений игишской свиты амфиболиты не установлены). Основой для этого послужили силикатные анализы пород, приведенные в табл. 5. Как это следует из рис. 8а, б, среди рассматриваемых основных эффузивов отмечены в подавляющем большинстве толеитовые разновидности. Часть

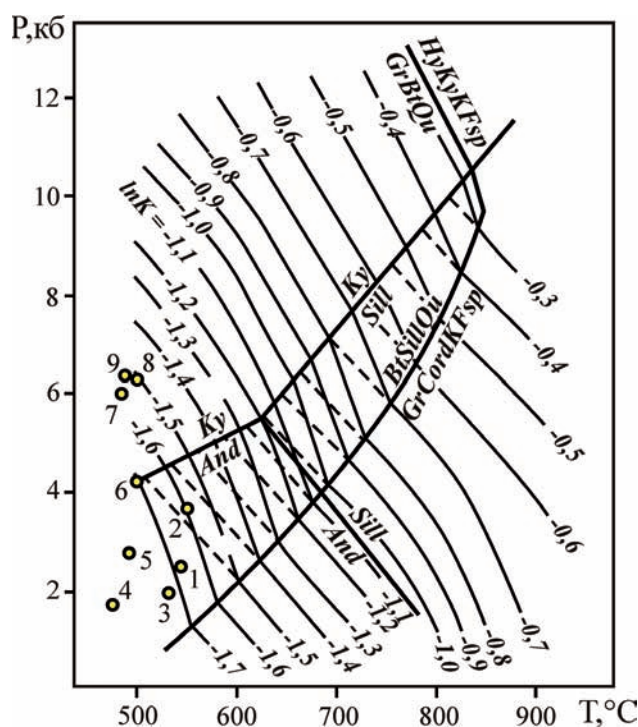


Рис. 4. Диаграмма P–T для определения давления по T и lnK в породах кундравинской и кыштымской свит (точки 1–9, см. табл. 2) [Термо- и барометрия..., 1977]

Примечания. Поля минералов: And — андалузит, Ky — кyanит, Sill — силлиманит, Bi — биотит, Gr — гранат, Cord — кордиерит, KFsp — калиевый полевой шпат, Qu — кварц, Hy — гиперстен.

Fig. 4. P–T diagram for determining pressure by T and lnK in the rocks of the Kundravi and Kyshtym Series (points 1–9, see table 2) [Termo- and barometry..., 1977]

Notes. Fields of minerals: And — andalusite, Ky — kyanite, Sill — sillimanite, Bi — biotite, Gr — garnet, Cord — cordierite, KFsp — potassium feldspar, Qu — quartz, Hy — hypersthene.

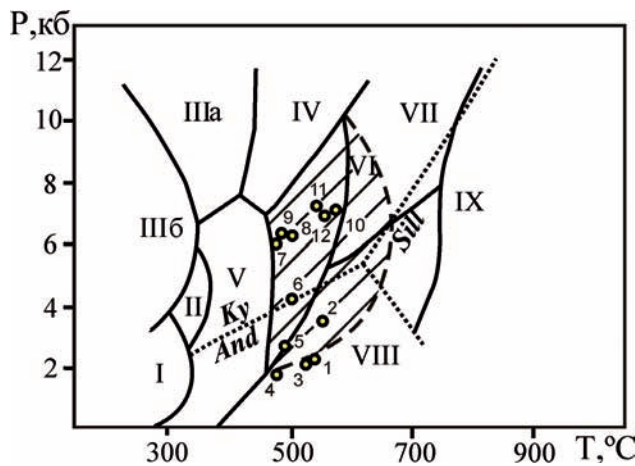


Рис. 5. Положение гранат-биотитовых и гранат-амфиболовых пар (см. табл. 2, 3) пород кундравинской, кыштымской и сайтовской свит на петрогенетической диаграмме [Термо- и барометрия..., 1977]

Примечания: сплошные линии — границы фаций, заштрихованное поле — поле устойчивости ставролита, точками показана тройная диаграмма And–Sill–Ky. Римскими цифрами обозначены фации: I — цеолитовая или пумпеллит-пренитовая, II — пумпеллит-актинолитовая, IIIa — глаукофан-лавсонитовая, IIIб — глаукофан-цоизитовая, IV — цоизит-кианит-кварцевых сланцев, V — зеленых сланцев, VI — эпидотовых амфиболитов, VII — альмандиновых амфиболитов, VIII — куммингтонитовых амфиболитов, IX — гранулитовая.

Fig. 5. The position of the garnet-biotite and garnet-amphibole pairs (see Tables 2, 3) of the rocks of the Kundravi, Kyshtym, and Saitovo series on the petrogenetic diagram [Termo- and barometry..., 1977]

Notes: solid lines — facies boundaries, shaded eld — staurolite stability eld, dots show a triple And–Sill–Ky diagram. Roman numerals indicate facies: I — zeolite or pumpellite-prenite, II — pumpellite-actinolite, IIIa — glaucophane-lavsonite, IIIб — glaucophan-zoisite, IV — zoisite-kyanite-quartz schists, V — green shales, VI — epidote, VII — almandine amphibolites, VIII — cummingtonite amphibolites, IX — granulite.

проб сайтовской свиты попала в субщелочное поле, для двух других свит субщелочные породы не характерны. Составы амфиболитов на диаграммах $TiO_2-(K_2O+Na_2O)$ и $TiO_2-Al_2O_3/(FeO+Fe_2O_3+MgO)$ (рис. 8в, г) расположились следующим образом: относительно высокотитанистые породы ($TiO_2 > 1$) в основном занимают нижние левые области в пределах полей эпиплатформенных и эпиорогенных континентальных рифтов [Сначёв и др., 2009], а низкотитанистые ($TiO_2 < 1$) — среди поля островных дуг. В последнем случае, скорее всего, следует говорить не о типичных островных дугах, а о режиме сжатия в процессе формирования основных эффузивов.

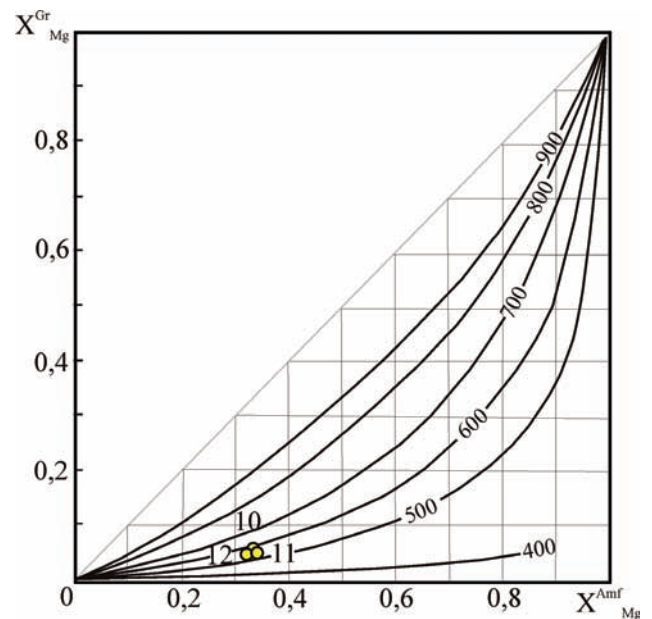


Рис. 6. Диаграмма фазового соответствия для пары гранат–амфибол сайтовской свиты [Термо- и барометрия..., 1977]

Примечание: обозначения 10–12 см. табл. 3.

Fig. 6. Phase correspondence diagram for a pair of garnet-amphibole of the Saitovo Series [Termo- and barometry..., 1977]

Note: designations 10–12, see table 3.

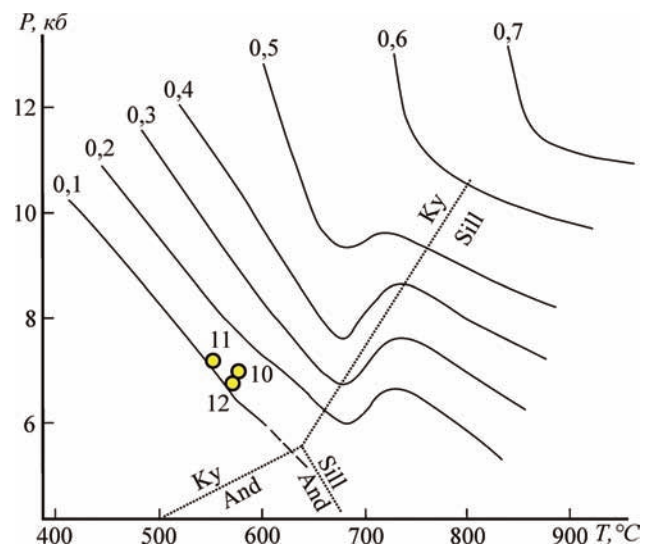


Рис. 7. Положение линий равных значений K_{Mg}^{Gr-Amf} на диаграмме Т–Р сайтовской свиты [Термо- и барометрия..., 1977]

Примечание: обозначения 10–12 см. табл. 3.

Fig. 7. Position of lines of equal K_{Mg}^{Gr-Amf} values on the T–P diagram of the Saitovo Series [Termo- and barometry..., 1977]

Note: designations 10–12, see table 3.

Таблица 5. Химический состав метабазальтов сайтовской свиты (мас. %)

Table 5. Chemical composition of metabasalts of the Saitovo Series (wt. %)

Окислы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ппп	сумма
1	43.66	0.59	11.48	2.15	10.20	0.25	10.80	15.22	0.75	0.36	0.19	4.00	99.65
2	46.67	0.88	11.32	3.39	11.48	0.22	9.69	12.31	1.19	0.33	0.08	2.42	99.98
3	49.75	1.36	18.32	2.37	8.16	0.10	4.93	7.12	3.61	2.12	0.25	1.98	100.07
4	51.00	0.38	12.61	0.29	7.34	0.14	10.09	11.10	3.73	0.34	0.07	3.16	100.25
5	45.72	0.96	22.07	2.17	9.13	0.14	4.42	10.13	3.12	0.38	0.13	0.68	99.04
6	45.86	1.68	14.07	3.53	10.22	0.37	8.45	12.79	2.00	0.20	0.16	0.54	99.47
7	48.16	0.78	16.83	2.05	6.62	0.15	9.65	12.34	2.20	0.20	–	–	99.46
8	48.67	0.96	10.15	1.04	8.99	0.13	4.35	10.39	3.22	0.28	0.11	0.88	99.17
9	49.70	1.16	18.98	3.67	8.43	0.15	4.47	7.29	5.34	0.20	0.13	0.60	100.12
10	49.84	1.26	18.48	2.92	11.18	0.21	5.02	5.06	4.80	1.00	0.13	0.80	100.70
11	50.13	1.72	17.39	3.00	8.82	0.18	4.73	7.40	5.37	0.34	0.16	0.74	99.98
12	50.48	0.85	17.48	3.72	7.99	0.21	5.39	7.50	4.34	0.20	–	–	99.68
13	50.95	1.08	15.21	4.05	9.53	0.07	5.42	7.83	4.26	0.30	0.11	1.18	99.99
14	51.38	1.32	13.81	15.26	1.23	0.19	5.91	6.12	4.78	0.34	0.11	0.26	100.71
15	51.58	1.32	14.31	4.10	11.89	0.19	5.32	6.26	5.00	0.34	0.11	0.44	100.86
16	51.64	1.16	15.66	2.79	8.36	0.13	6.86	8.32	4.06	0.20	0.09	1.66	100.93
17	52.37	0.96	18.93	2.23	9.76	0.17	4.52	4.34	5.33	0.84	0.16	0.78	100.39
18	52.58	1.32	15.56	3.20	9.90	0.27	5.62	6.17	4.70	0.21	0.18	0.40	100.11
19	45.32	0.95	17.82	3.46	10.58	0.29	6.05	10.72	4.24	0.20	0	0	100.73
20	45.36	1.68	14.07	3.53	10.22	0.37	8.45	12.79	2.00	0.20	0.16	0.54	99.47
21	47.00	1.12	18.40	4.23	6.13	0.22	4.58	15.64	1.30	0.22	0.06	1.56	100.64
22	48.16	0.78	16.83	2.05	6.62	0.15	9.65	12.34	2.20	0.20	0	0	99.46
23	49.06	1.00	15.89	1.91	7.15	0.14	7.37	13.49	2.50	0.54	0.10	0.58	99.73
24	49.23	1.72	15.30	3.95	9.46	0.17	6.30	9.90	2.78	0.26	0.20	1.10	100.37
25	49.60	1.90	13.09	3.31	11.58	0.21	6.27	8.82	2.76	0.21	0.17	1.88	99.96
26	50.53	1.13	17.90	2.27	8.63	0.15	4.75	8.10	4.04	0.30	0.15	0.89	99.39
27	51.60	1.25	15.67	4.61	8.93	0.32	5.28	8.24	2.46	0.20	0.13	0	99.51
28	51.77	0.95	17.05	1.93	7.29	0.15	4.57	8.85	3.87	0.34	0.76	2.27	99.91
29	47.19	1.88	16.88	1.23	12.75	0.18	4.81	5.01	2.80	3.50	0.33	2.18	98.02
30	50.02	1.92	14.22	4.22	8.37	0.16	7.32	9.72	3.08	0.46	0.74	1.14	100.80
31	50.98	1.20	15.32	1.90	8.12	0.06	6.42	11.04	2.92	0.25	0.294	0.52	99.02
32	49.40	1.67	15.47	2.45	9.75	0.13	6.18	8.59	2.93	1.40	0.266	1.28	99.28

Примечания: 1–4 — амфиболовые карбонатсодержащие плагиосланцы верхнесайтовской подсвиты, 4–18 — роговообманковые плагиосланцы нижнесайтовской подсвиты, 19–28 — амфиболиты кыштымской свиты, 29–32 — амфиболовые плагиосланцы кундравинской свиты. Анализы заимствованы из работы В.И. Петрова и др. [2003].

Notes: 1–4 — amphibole carbonate-bearing plagioclites of the Upper Saitovo subseries, 4–18 — hornblende plagioclites of the Lower Saitovo subseries, 19–28 — amphibolites of the Kyshtym Series, 29–32 — amphibole plagioclites of the Kundravi Series. The analyzes were borrowed from the monograph of V.I. Petrov et al. [2003].

Заклучение

Таким образом, учитывая приведенные выше геологические, петрохимические и термобарометрические данные по биотит-гранатовому и амфибол-гранатовому парагенезисам и углеродистым сланцам, можно предположить, что черносланцевые отложения сайтовской, кундравинской, кыштымской и игишской свит Ильменогорско-Сысертского

антиклинория образовались в дистальной глубоко-водной и удаленной от береговой линии области осадочного бассейна. Они относятся к низкоуглеродистому и углеродистому типам, а также кремнисто-углеродистой формации, имеющей минимальное количество терригенной примеси в своем составе. На рубеже рифея и венда, когда на Южном Урале произошла крупная структурная перестройка, вулканогенно-осадочные породы перечисленных

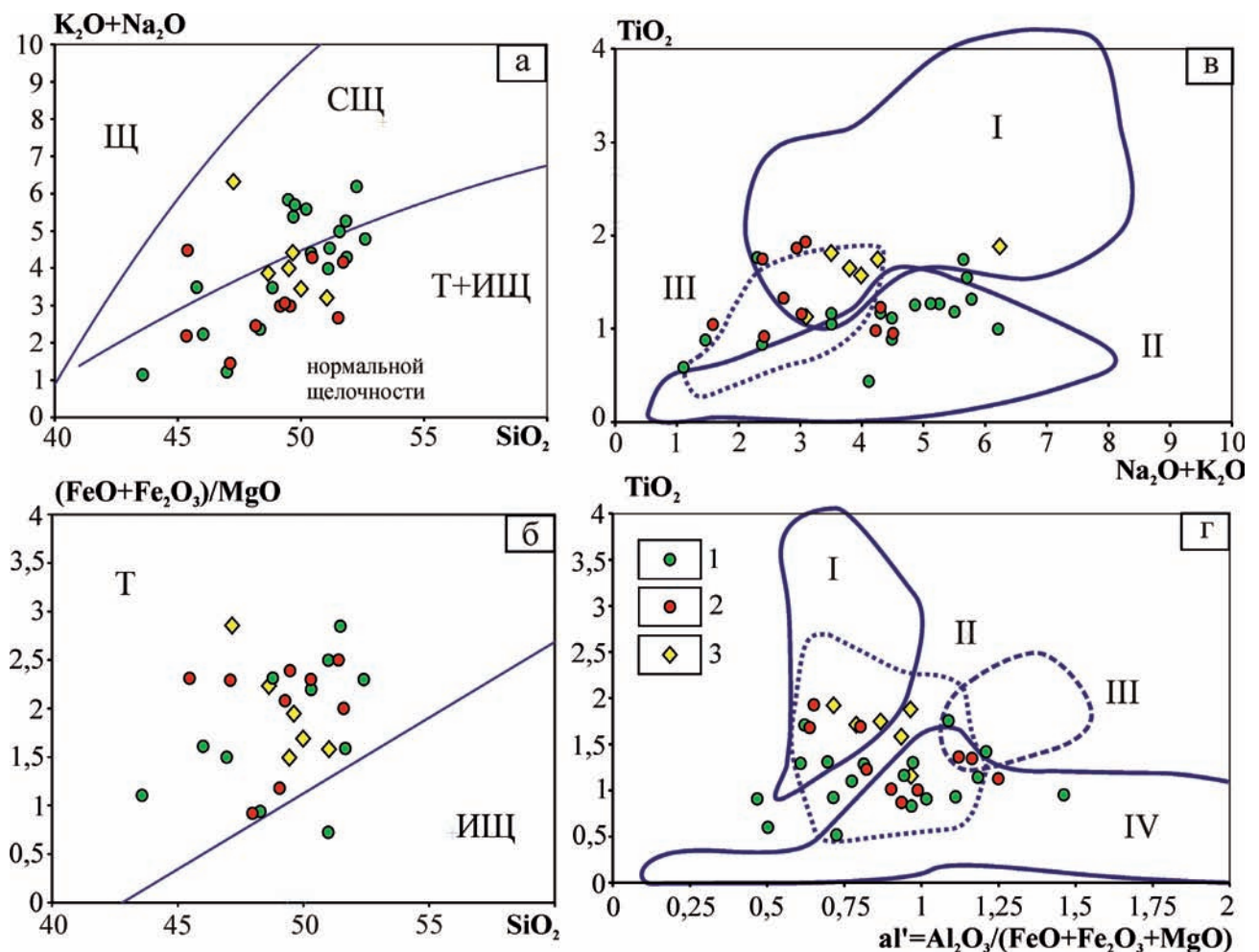


Рис. 8. Диаграммы SiO_2 – $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (а), SiO_2 – $(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{MgO}$ (б), TiO_2 – $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (в) и al' – TiO_2 (г) для метабазальтов сайтовской, кыштымской и кундравинской свит

Условные обозначения: свиты: 1 — сайтовская, 2 — кыштымская, 3 — кундравинская. Поля составов базальтов (а, б): Щ — щелочное, СИЩ — субщелочное, Т — толеитовое, ИЩ — известково-щелочное; (в): I — эпиплатформенных континентальных рифтов, II — островных дуг, III — срединно-океанических хребтов; (г): I — эпиплатформенных континентальных рифтов, II — срединно-океанических хребтов, III — эпиорогенных континентальных рифтов, IV — островных дуг. Поля составов базальтов заимствованы из работы Д.Е. Савельева и др. [2006].

Fig. 8. Diagrams SiO_2 – $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (а), SiO_2 – $(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{MgO}$ (б), TiO_2 – $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (с) and al' – TiO_2 (д) for metabasalts of the Saitovo, Kyshtym and Kundravi Series

Legend: Series: 1 — Saitovo, 2 — Kyshtym, 3 — Kundravi. Basalt composition fields (а, б): Щ — alkaline, СИЩ — subalkaline, Т — tholeiitic, ИЩ — calc-alkaline; (в): I — epiplatform continental rifts, II — island arcs, III — mid-ocean ridges; (г): I — epiplatform continental rifts, II — mid-ocean ridges, III — epirogenic continental rifts, IV — island arcs. The compositional fields of basalts were borrowed from the work of D.E. Savelyev et al. [2006].

выше свит испытали региональный метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации ($T=470$ – 580°C , $P=2.0$ – 7.2 кбар, абиссальная зона глубинности). В дальнейшем, в период становления крупных Аргазинского, Кисегачского, Еланчиковского и Чашковского гранитоидных массивов, отложения Ильменогорско-Сысертского антиклинория подверглись зональному контактовому

метаморфизму. В зависимости от расстояния до кислых интрузий они испытали преобразование в условиях от фации альмандиновых амфиболитов ($T=750$ – 770°C , $P=8.8$ – 9.0 кбар) [Сначёв, 2021] до куммингтонитовых амфиболитов ($T=530$ – 550°C , $P=2.1$ – 3.6 кбар).

Работа выполнена в рамках Государственного заказа по теме № 0246-2019-0078.

Список литературы:

- Блюман Б.А., Дьяконов Ю.С., Красавина Т.Н., Павлов М.Г. Использование термо- и рентгено-графических характеристик графита для определения уровня и типа метаморфизма // Записки ВМО. 1974. Т. 103, № 1. С. 95–103.
- Борнеман-Старынкевич И.Д. Руководство по расчету формул минералов. М.: Наука, 1964. 224 с.
- Горбачёв О.В., Созинов Н.А. Некоторые петрохимические и геохимические аспекты типизации углеродистых отложений докембрия // Проблемы осадочной геологии докембрия. М.: Наука, 1985. С. 55–62.
- Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначёв В.И., Жданов А.В., Каримов Т.Р., Айдаров Э.М., Масагутов Р.Х., Арсланова Э.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Сер. Уральская. Лист N–40 (Уфа). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. 512 с.
- Крупенин М.Т., Маслов А.В., Рыкус М.В., Сначев В.И. Новые данные о содержании $C_{орг}$ в сланцах нижнего и среднего рифея Южного Урала // Труды Института геологии и геохимии. УрО РАН, 1993. № 140. С. 19–20.
- Пермяков Б.Н. Чашковско-Еланчиковский мигматит-гнейсогранитный массив (Южный Урал). Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2000. 187 с.
- Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. М.: Недра, 1976. 287 с.
- Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. 2-е изд. Сер. Южноуральская. Лист N-41-VII (Миасс). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ВСЕГЕИ, 2003. 167 с.
- Рыкус М.В., Сначёв В.И. Особенности палеозойского углеродистого осадконакопления Сысертско-Ильменогорской зоны Южного Урала // Осадочные бассейны: закономерности строения и эволюции, минерагения. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2000. С. 112–114.
- Савельев Д.Е., Сначёв А.В., Пучков В.Н., Сначёв В.И. Петрогеохимические и геодинамические особенности формирования ордовикско-раннесилурийских базальтов восточного склона Южного Урала // Геологический сборник № 5 / ИГ УНЦ РАН. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. С. 86–104.
- Силаев В.И., Смолева И.В., Антошкина А.И., Чайковский И.И. Опыт сопряженного анализа изотопного состава углерода и азота в углеродистых веществах разного происхождения // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Матер. науч. чтений памяти П.Н. Чирвинского. Пермь: Изд-во ПГУ, 2012. № 15. С. 342–366.
- Сначёв А.В. Палеогеографические условия образования и метаморфизм углеродистых отложений саитовской и игишской свит (Ильменогорско-Сысертский антиклинорий) // Нефтегазовое дело. 2021. № 3. С. 17–25.
- Сначёв А.В., Пучков В.Н., Сначёв В.И., Савельев Д.Е., Бажин Е.А. Большаковский габбровый массив — фрагмент Южно-Уральской зоны раннекаменноугольного рифта // ДАН. 2009. Т. 429, № 1. С. 79–81.
- Сначёв В.И., Сначёв А.В. Условия метаморфизма пород кыштымской толщи (Ильменогорско-Сысертский метантиклинорий) // Известия УНЦ РАН. 2019. № 3. С. 24–31.
- Термо- и барометрия метаморфических пород / Под ред. В.А. Глебовицкого. Л.: Наука, 1977. 207 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. 272 с.
- Buseck P.R., Beyssac O. From organic matter to graphite: graphitization // Elements. 2014. Vol. 10. No. 6. P. 421–426. DOI: 10.2113/gselements.10.6.421.

References:

- Bluman B.A., Dyakonov Yu.S., Krasavina T.N., Pavlov M.G. (1974) The use of thermal and X-ray characteristics of graphite to determine the level and type of metamorphism. *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo obshchestva – Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 103(1), 95-103. (In Russian).
- Borneman-Starynkevich I.D. (1964) *Rukovodstvo po raschetu formul mineralov* [Guidelines for the calculation of mineral formulas]. Moscow, Nauka Publ., 224 p. (In Russian).
- Buseck P.R., Beyssac O. (2014) From organic matter to graphite: graphitization. *Elements*, 10(6), 421-426. DOI: 10.2113/gselements.10.6.421
- Gorbachev O.V., Sozinov N.A. (1985) Some petrochemical and geochemical aspects of the typification of carbonaceous deposits of the Precambrian. *Problemy osadochnoy geologii dokembriya* [Problems of sedimentary geology of the Precambrian]. Moscow, Nauka Publ., 55-62. (In Russian).
- Knyazev Y.G., Knyazeva O.Y., Snachev V.I., Zhdanov A.V., Karimov T.R., Aydarov E.M., Masagutov R.K., Arslanova E.R. (2013) *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (3 pocolenie). Seriya Ural'skaya. List N-40 (Ufa). Ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (3rd Generation). Ural Series. Sheet N-40 (Ufa). Explanatory letter]. Saint Petersburg: VSEGEI Publ., 512 p. (In Russian).
- Krupenin M.T., Maslov A.V., Rykus M.V., Snachev V.I. (1993) New data on Corg content in shales of the Lower and Middle Riphean of the South Urals. *Trudy Instituta geologii i geokhimii* [Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry UrO RAN], (140), 19-20. (In Russian).
- Permyakov B.N. (2000) *Chashkovsko-Yelanchikovskiy migmatit-gneysogranitnyy massiv (Yuzhnyy Ural)* [Chashkovsko-Elanchikovsky migmatite-gneiss-granite massif (South Urals). Miass, IGZ UrO RAN, 187 p. (In Russian).
- Perchuk L.L., Ryabchikov I.D. (1976) *Fazovoe sootvetstvie v mineral'nykh sistemah* [Phase matching in mineral systems]. Moscow, Nedra Publ., 287 p. (In Russian).
- Petrov V.I., Shalaginov A.E., Punegov B.N. (2003) *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200 000. 2-ye izd. Seriya Yuzhno-Ural'skaya. List N-41-VII (Miass). Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. 2nd ed. Series South Ural. Sheet N-41-VII (Miass). Explanatory letter]. Moscow, VSEGEI Publ., 167 p. (In Russian).
- Rykus M.V., Snachev V.I. (2000) Features of Paleozoic carbonaceous sedimentation of the Sysertsko-Ilmenogorsk

zone of the Southern Urals. *Osadochnyye basseyny: Zakonomernosti stroeniya i evolyutsii, minerageniya* [Sedimentary basins: Patterns of structure and evolution, minerageny]. Yekaterinburg, IGIg UrO RAN, 112-114. (In Russian).

Saveliev D.E., Snachev A.V., Puchkov V.N., Snachev V.I. (2006) Petrogeochemical and geodynamic features of the formation of Ordovician-Early Silurian basalts on the eastern slope of the Southern Urals. *Geologicheskii sbornik – Geological Digest*, (5), 86-104. (In Russian).

Silaev V.I., Smoleva I.V., Antoshkina A.I., Tchaikovskiy I.I. (2012) Experience of conjugated analysis of the isotopic composition of carbon and nitrogen in carbonaceous substances of different origin. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii*. Materialy nauchnykh chteniy pamyati P.N. Chirvinskogo [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny: Materials of scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky]. Perm, PGU Publ., (15), 342-366. (In Russian).

Snachev A.V. (2021) Paleogeograficheskiye usloviya obrazovaniya i metamorfizm uglerodistykh otlozheniy saitov-

skey i igishskoy svit (Il'menogorsko-Sysertskiy antiklinoriy) [Paleogeographic conditions of formation and metamorphism of carbonaceous deposits of the Saitovskaya and Igishskaya formations (Ilmenogorsk-Sysertskiy anticlinorium)]. *Neftegazovoe delo – Oil and Gas Business*, (3), 17-25. (In Russian).

Snachev A.V., Puchkov V.N., Snachev V.I., Savelyev D.E., Bazhin E.A. (2009) Bol'shakovsky gabbro massif, fragment of the South Ural zone of the Early Carboniferous rift. *Dokl. Akad. Nauk*, **429**(1), 79-81. (In Russian).

Snachev V.I., Snachev A.V. (2019) Conditions of metamorphism of rocks of the Kyshtym sequence (Ilmenogorsk-Sysertskiy meganticlinorium). *Izvestiya UNTS RAN*, (3), 24-31. (In Russian).

Termo- i barometriya metamorficheskikh porod (1977) [Thermo- and barometry of metamorphic rocks]. Leningrad, Nauka Publ., 207 p. (In Russian).

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2015) *Geokhimiya chernykh slantsev* [Geochemistry of black shale]. Moscow-Berlin, Direkt-Media Publ., 272 p. (In Russian).

Сведения об авторах:

Сначёв Владимир Иванович, доктор геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: SAVant@inbox.ru

Сначёв Александр Владимирович, кандидат геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: SAVant@rambler.ru

About the authors:

Snachev Vladimir Ivanovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Geology of the Uralian Scientific Centre (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: SAVant@inbox.ru

Snachev Alexander Vladimirovich, Candidate of geological and mineralogical sciences, Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Geology of the Uralian Scientific Centre (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: SAVant@rambler.ru