ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И МЕТАМОРФИЗМ УГЛЕРОДИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ САИТОВСКОЙ И ИГИШСКОЙ СВИТ (ИЛЬМЕНОГОРСКО-СЫСЕРТСКИЙ АНТИКЛИНОРИЙ)

PALEO GEOGRAPHIC CONDITIONS OF FORMATION AND METAMORPHISM OF CARBONACEOUS DEPOSITS OF THE SAITOV AND IGISH FORMATIONS (ILMENOGORSK-SYSERT ANTICLINORIUM)

А. В. Сначёв

Aleksandr V. Snachev

Институт геологии
Уфимского федерального
исследовательского центра РАН,
г. Уфа, Российская Федерация

Institute of Geology, Ufa Federal
Research Centre of the Russian
Academy of Sciences,
Ufa, Russian Federation

В восточной части Ильменогорско-Сысертского блока углеродистые отложения широко представлены в сайтовской и игишской свитах. В составе нижнесайтовской подсвиты (RF_{2ns}) отмечены: амфиболовые апобазальтовые плагиосланцы, редко биотитовые и гранат-биотитовые сланцы и кварциты. Верхнесайтовская подсвита (RF_{2vs}) представлена амфиболовыми, гранат-биотит-амфиболовыми, биотит-амфиболовыми, гранат-биотитовыми и биотитовыми плагиосланцами, а в средней и верхней частях среди них встречаются многочисленные прослои графитистых кварцитов, содержащих включения фосфоритов. Игишская свита (RF_{2ig}) сложена разнообразными графитистыми темно-серыми до черных кварцитами. Породы свиты отвечают положительным формам рельефа, слагая Игишский хребет.

Учитывая приведенные в статье геологические, петрохимические и аналитические данные, можно предположить, что черносланцевые отложения сайтовской и игишской 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, черносланцевые толщи испытали региональный метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации ($T = 550\text{--}580^\circ\text{C}$, $P = 6,8\text{--}7,2$ кбар, абиссальная зона глубинности). В дальнейшем, в период становления крупных Аргазинского, Кисегачского, Еланчиковского и Чашковского гранитоидных массивов, рассматриваемые отложения подверглись контактовому метаморфизму в условиях фации альмандиновых амфиболитов, что привело к выгоранию в них Сорг, а также резкому снижению потенциальной нефтегазонасности пород обрамления интрузий.

Ключевые слова

Южный Урал; сайтовская свита; игишская свита; углеродистые отложения; палеогеография; температура; давление; контактовый метаморфизм; региональный метаморфизм

In the eastern part of the Ilmenogorsk-Sysert block, carbonaceous deposits are widely represented in the Saitov and Igish Formations. The Lower Saitov Subformation (RF_{2ns}) contains: amphibole apobasaltic plagioclites, rarely biotite and garnet-biotite schists, and quartzites. The Upper Saitov Subformation (RF_{2ys}) is represented by amphibole, garnet-biotite-amphibole, biotite-amphibole, garnet-biotite, and biotite plagioclites, and in the middle and upper parts of them there are numerous interlayers of graphitic quartzites containing phosphorite inclusions. The Igish Formation (RF_{2ig}) is composed of uniform graphitic dark gray to black quartzites. The rocks of the suite correspond to positive forms of relief, making up the Igish ridge.

Taking into account the geological, petrochemical and analytical data presented in the article, it can be assumed that the black shale deposits of the Saitov and Igish Formations were formed in the distal deep-water and remote from the coastline area of the sedimentary basin. They belong to the low-carbon 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 took place in the Southern Urals, the black shale strata experienced regional metamorphism under the conditions of the epidote-amphibolite facies ($T = 550\text{--}580^\circ\text{C}$, $P = 6.8\text{--}7.2$ kbar, abyssal depth zone). Subsequently, during the formation of the large Argazi, Kisegach, Elanchikov and Chashkov granitoid massifs, the considered deposits underwent contact metamorphism under the conditions of the almandine amphibolite facies, which led to the burning out of Corg in them, as well as a sharp decrease in the potential oil and gas content of the rocks surrounding the intrusions.

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, довольно широко представленные среди развитых здесь вулканогенно-осадочных образований, остались либо не изученными, либо информация по ним осела в фондовых отчетах, хотя именно они могут дать очень важную информацию о палеогеографических и физико-химических условиях накопления осадков, об источниках сноса терригенного материала, о степени преобразованности пород в результате регионального и зонального контактового метаморфизма. Кроме того, в последние десятилетия черносланцевым толщам в мире придается огромное значение, обусловленное получением из них сланцевого газа и нефти. При этом, одним из основных параметров, характеризующих нефтегазоносность углеродистых отложений, является содержание в них $C_{орг}$. В данной статье автором как раз и предпринята попытка внести определенный вклад в уточнение истории формирования черносланцевых толщ, их типизацию, формационное расчленение, изучение органического углерода, выяснение физико-химических условий метаморфизма.

Keywords

South Urals; Saitov Formation; Igish Formation; carbonaceous deposits; paleogeography; temperature; pressure; contact metamorphism; regional metamorphism

Методика исследований

Термогравиметрический анализ углеродистых пород проводился на дериватографе Q-1500 (аналитик Т.И. Черникова, ИГ УФИЦ РАН). Нагрев осуществлялся на воздухе от 20°C 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 и гранатов, обобранных 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 граната — пироп, андрадит и гроссуляр).

Геологическое строение сайтовской и игишской свит

В восточной части Ильменогорско-Сысертского блока углеродистые отложения широко представлены в сайтовской и игишской свитах, поэтому ниже остановимся только на них, используя отчет В.И. Петрова

и др. [1], а также собственные данные, полученные автором в ходе геолого-съёмочных и тематических работ в пределах листа N-41-VII (Миасс) [2, 3] (рисунок 1).

Нижнесаитовская подсвета (RF₂ns) распространена в западном и восточном крыльях Ильменогорской структуры. Ее состав: амфиболовые апобазальтовые плагиосланцы, редко

Основные обозначения: 1 — аракульская свита (плагиосланцы биотитовые, гранат-биотитовые); 2 — нижнесаитовская подсвита (плагиосланцы амфиболовые, прослои кварцитов); 3 — верхнесаитовская подсвита (плагиосланцы амфиболовые, гранат-биотит-амфиболовые, прослои графитистых кварцитов); 4 — игишская свита (кварциты графитистые, фосфоритсодержащие); 5 — шеметовская толща (базальты и их лавовые брекчии, прослои андезитов); 6 — булатовская толща (сланцы углеродисто-кремнистые, кварциты); 7 — каганский комплекс метаморфизованных ультрамафитов и габброидов; 8, 9 — чебаркульско-казбаевский комплекс: 8 — серпентиниты аподунитовые, апогарцбургитовые, 9 — серпентинизированные габбро; 10 — уразбаевский комплекс тоналит-плагиогранитовый; 11, 12 — увильдинский комплекс: 11 — вторая фаза (граносиениты), 12 — третья фаза (граниты биотитовые, лейкограниты); 13 — точки опробования; 14 — населенные пункты.

I — Ильменогорско-Сысертский антиклинорий,
II — Арамильско-Сухтелинская зона.

Рисунок 1. Геологическое строение участка работ
(составлена по материалам В.И. Петрова и др. [1], с упрощениями автора)

биотитовые и гранат-биотитовые сланцы и кварциты. Она согласно налегает на аракульскую и согласно перекрывается верхнесаитовской подсвитой.

Амфиболовые плагиосланцы имеют немагнитообластовую структуру. Их состав (в %): плагиоклаз (20–60), амфибол (30–70), кварц (2–3), гранат (0–5), магнетит (1–3); вторичные — эпидот, хлорит, карбонат. Плагиоклаз от № 26 до № 70, часто зональный. В породах, подвергнутых гранитизации, присутствует куммингтонит. Они отвечают умеренномагнезиальным, умереннотитанистым и низкокалиевым базальтам. В них выше кларков основных пород содержание Cu, Be, Ga. Мощность её 760 м, метаморфизм отвечает условиям эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций.

Верхнесаитовская подсвита (RF₂vs) занимает среднюю и верхнюю части саитовской свиты. В её составе: амфиболовые, гранат-биотит-амфиболовые, биотит-амфиболовые, гранат-биотитовые и биотитовые плагиосланцы, а в средней и верхней частях среди них встречаются многочисленные прослои графитистых кварцитов, содержащих включения фосфоритов. Мощность свиты — 560 м. В её объеме кварцитов 15 %, биотитовых и гранат-биотитовых сланцев — 40 %, амфиболовых — 45 %. Графитистые кварциты содержат биотит, гранат и включения углистых фосфоритов, обрастаемых иногда апатитом. Встречаются кварцитовидные сланцы с мелким «икряным» спессартиновым гранатом, образующиеся, вероятно, по марганцовистым кремнистым туффитам.

Амфиболовые сланцы отличаются от нижнесаитовских меньшим содержанием TiO₂ и Al₂O₃ и большим MgO, CaO и K₂O. Содержания в них данных элементов ниже кларков основных пород. В графитистых кварцитах выше кларков осадочных пород содержания V, Cu, Zn, Ag, Mo, Sn. Породы метаморфизованы в условиях эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций. С породами толщи связана минерализация графита и потенциальная перспективность на платиноиды.

В разрезе на северо-восточном склоне хр. Игиш графитистые кварциты составляют 17 %, биотитовые и гранат-биотитовые сланцы 55 %, амфиболсодержащие сланцы 28 %, а общая мощность разреза составляет 440 м.

В гравитационном поле подсвита благодаря своему промежуточному положению

между относительно тяжелой нижнесаитовской подсвитой и легкой игишской свитой не выражена, магнитное поле над ней спокойное с незначительными аномалиями. Амфиболовые сланцы имеют плотность 2,87–2,88 г/см³, гранат-амфибол-биотитовые — 2,87 г/см³, гранат-биотитовые и биотитовые плагиосланцы — 2,70–2,74 г/см³. Химический состав графитистых кварцитов приведен в таблице 1.

Игишская свита (RF₂ig) 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 [1]. Кроме кварцитов в составе свиты в небольшом объеме встречаются прослои биотитовых, гранат-биотитовых, ставролит-гранат-биотитовых, реже амфибол-биотитовых, гранат-амфибол-биотитовых сланцев. Графитистые кварциты содержат в небольшом количестве светло-коричневый и оранжевый биотит, серицит, гранат, который в протоловках имеет черный цвет от углистых включений. В некоторых разновидностях, обогащенных до проявления метаморфизма глинистым или гидрослюдисто-глинистым материалом, встречаются кроме граната порфириобласты 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. Несколько реже встречаются близкие по облику включения карбонатно-глинистого, вероятно, доломит-кальцитового состава с высоким содержанием MgO и MnO (8,51 % и 0,89–0,94 %). Довольно часто в кварцитах присутствует пирит и пирротин. Большой спектр минералов отмечается при изучении протолок: апатит, биотит, гранат, мусковит, хлорит, амфибол, полевые шпаты, рутил, сфен, магнетит, гематит, ильменит, пирит, пирротин, халькопирит, борнит, арсенопирит, сфалерит. Мощности фосфоритоносных прослоев кварцитов составляют 2,0–15,0 м в разрезах в районе д. Саитово. Содержанием P₂O₅ в кварцитах изменяется от 1,5 % до 4,58 %. Мощность кварцитов на хр. Игиш составляет 4,9–7,4 м с содержанием в них P₂O₅ от 1,67 % до 2,89 %. Содержание P₂O₅ в фосфоритовых включениях изменяется от 5,5 % до 22,9 %.

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 мало-мощные тела метаморфизованных ультрамафитов (антигоритовых серпентинитов и тальк-карбонатных пород). Мощность свиты по данным бурения и отстройки разрезов оценивается в 400–500 м. Химический состав пород свиты приведен в таблице 1. Возраст свиты и в целом саитовской серии при проведении ГДП-50 (Юрецкий и др., 1982ф) определен как вендский, но позднее был пересмотрен в сторону удревнения и рассматривается как среднерифейский [4].

Таким образом, приведенные данные не позволяют однозначно датировать саитовскую и игишскую свиты, в то же время есть основания для отнесения их в состав палеозойских

образований, в частности булатовской толщи [5], охарактеризованной фауной граптолитов и конодонтов. Однако всеми исследователями отмечается отсутствие в кварцитах игишской свиты остатков радиолярий, широко распространенных в углеродистых сланцах булатовской толщи. Среднерифейский возраст описываемых свит принят в соответствии со Стратиграфическими схемами Урала, 1993 г. [1, 6].

Обсуждение результатов исследований

Обратимся к таблице 1, где собраны результаты силикатного анализа черносланцевых пород саитовской и игишской свит. Хорошо видно, что по главным компонентам они не отличаются друг от друга и имеют довольно стабильные их значения: $\text{SiO}_2 = 81,19\text{--}95,28\%$ и $77,05\text{--}96,52\%$ (соответственно в саитовских и игишских образованиях), $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,40\text{--}5,12\%$ и $0,40\text{--}6,67\%$,

Таблица 1. Химический состав углеродистых пород саитовской и игишской свит

№ п/п	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_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	0,024	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	100,27
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	100,42
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	100,12
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

Примечания:

1–9 — саитовская свита, 10–23 — игишская свита;

1–3, 10–12 — собственные данные;

4–9, 13–23 — заимствованы из отчета В.И. Петрова и др. [1].

$\text{CaO} = 0,07-2,21\%$ и $0,10-2,57\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 0,18-1,60\%$ и $0,27-2,18\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,04-1,23\%$ и $0,02-1,03\%$. На диаграмме А-С-С О.В. Горбачёва и Н.А. Созинова [7] (рисунок 2) все 23 пробы очень компактно укладываются в правую половину поля кремнисто-углеродистой формации, при этом коэффициенты А, S, С для сайтовской свиты находятся в пределах $(-28,43)-(+12,67)$ (среднее значение $-0,34$), $1371-1649$ (1535) и $0,09-2,95$ ($1,57$), а для игишской — $(-37,8) - (+15,06)$ ($-3,03$), $1329-1663$ (1514) и $0,12-2,91$ ($1,52$). Учитывая обратнопропорциональную зависимость коэффициента S с долей терригенной примеси в осадках, которая, в свою очередь, связана с глубиной бассейна осадконакопления, можно сделать однозначный вывод от отложении рассматриваемых пород в пределах наиболее глубоководной области водоема. Отсутствие в разрезах обеих свит карбонатных пород, а также очень незначительная величина коэффициента $\text{C} = \text{CaO} + \text{MgO}$ ($0,09-1,57\%$) подтверждают данный вывод.

Имея дело с углеродистыми отложениями вначале следует оговорить содержание в них Сорг. Определение данного параметра в породах сайтовской и игишской свит проведено термическим методом, положения точек отбора проб указано на рисунке 1. Для первой из них значения Сорг составило $0,5-1,9\%$ для второй — $1,4-3,6\%$ (таблица 2), что, согласно классификации Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис [8], соответствует низкоуглеродистому и углеродистому типам.

Кроме $\text{C}_{\text{орг}}$ термический анализ позволил оценить и степень регионального метаморфизма отложений сайтовской и игишской свит (таблица 2) [9]. Температура начала экзотермического эффекта в них составила $580-590^\circ\text{C}$ и $580-600^\circ\text{C}$, а температура, полученная по максимуму графиков термограмм — $700-770^\circ\text{C}$ и

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 $\text{C} = (\text{CaO} + \text{MgO})$ — в массовых долях оксидов. 1 — сайтовская свита, 2 — игишская свита

Рисунок 2. Положение точек состава углеродистых отложений сайтовской и игишской свит на классификационной диаграмме А-С-С О.В. Горбачёва, Н.А. Созинова [7]

$720-770^\circ\text{C}$. Подобные значения температур, по данным Б.А. Блюмана и др. [10], указывают на эпидот-амфиболитовую и зеленосланцевую фацию метаморфизма пород. Примечательно, что все данные пробы на диаграмме термической устойчивости углеро-

Таблица 2. Результаты термического анализа углеродистых пород сайтовской и игишской свит

№ п/п	№ пробы	Температура начала эффекта, ($^\circ\text{C}$)	Температура максимума эффекта, ($^\circ\text{C}$)	Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$
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

Примечания: 1-3 — сайтовская свита; 4-6 — игишская свита.

дистых веществ В.И. Силаева и др. [11] (рисунок 3) попадают в поле IV (высшие кериты, антраксолиты, шунгиты), расположенное в центральной части тренда.

Рассматриваемая территория, расположенная в восточной части Ильменогоско-

Примечания: 1 — сайтовская свита, 2 — игишская свита; ступени выгорания по В.И. Силаеву и др. [11]: I — современные растения, органическое вещество в неметаморфизованных осадочных породах, копролиты; II — асфальты, низшие кериты; III — асфальтиты, кериты; IV — высшие кериты, антраксолиты, шунгиты; V — графит, карбонадо; VI — алмазы

Рисунок 3. Положение точек углеродистых пород сайтовской и игишской свит на диаграмме термической устойчивости углеродистых веществ

Сысертского блока, насыщена различными по размеру и формационной принадлежности гранитоидными телами: с севера черносланцевые отложения прорываются крупным Аргазинским массивом (рисунок 1), небольшими интрузиями уразбаевского тоналит-плагиогранитового и увельдинского гранит-граносиенитового комплексов, с востока — Кисегачским, с юга —

Еланчиковским и Чашковским гнейсо-мigmatитовыми массивами, что привело к интенсивному контактовому метаморфизму пород сайтовской и игишской свит. Ранее [12] было показано, что до внедрения гранитоидов данные углеродистые отложения испытали региональный метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации ($T = 550-580^\circ\text{C}$, $P = 6,8-7,2$ кбар, абиссальная зона глубинности), что подтверждается и вышеприведенными данными термического анализа.

Для оценки параметров контактового метаморфизма проведено изучение составов амфибол-гранатового парагенезиса в нескольких пробах сайтовской свиты, отобранных всего в нескольких метрах от контакта Аргазинского массива (таблица 3). Микрозондовое изучение трех пар граната и амфибола позволило рассчитать формулы минералов по методике И.Д. Борнеман-Старынкевич [13], а затем с помощью диаграмм фазового соответствия [14, 15] получить температуры и давление контактового метаморфизма.

Важно отметить, что составы амфиболов и гранатов альмандинового ряда очень стабильны, вариации компонентов в них незначительны. Согласно рисункам 4 и 5, три минеральные пары образуют компактное поле, соответствующее $T = 750-770^\circ\text{C}$ и давлению 8,8–9,0 кбар. На схеме фаций регионального метаморфизма (рисунок 6) данные точки четко укладываются в поле альмандиновых амфиболитов. Понятно, столь высокая степень контактового метаморфизма углеродистых отложений сайтовской и игишской свит привела к выгоранию $C_{\text{орг}}$, что резко снижает их потенциальную нефтегазоносность по всему обрамлению Аргазинского, Кисегачского, Еланчиковского и Чашковского массивов.

Таблица 3. Состав амфибола (Amf) и граната (Gr) из пород сайтовской свиты (% масс.)

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-1	43,65	0,79	14,61	18,33	—	10,66	8,69	1,32	0,33	98,37	0,46
Amf-2	43,45	0,92	15,60	17,60	—	10,49	8,56	1,37	0,42	98,41	0,46
Amf-3	43,55	0,75	15,18	17,12	—	10,74	9,10	1,39	0,41	98,26	0,49
Gr-1	37,95	0,30	21,38	30,94	0,67	4,30	4,68	—	—	100,22	0,21
Gr-2	37,71	0,28	21,43	30,57	0,91	4,52	4,32	—	—	99,74	0,20
Gr-3	37,65	0,18	21,24	30,70	0,73	4,21	4,70	—	—	99,41	0,21

Amf-1 — $(\text{Ca}_{1,66}\text{Na}_{0,37}\text{K}_{0,06})_{2,09}(\text{Fe}_{2,22}\text{Mg}_{1,88}\text{Ti}_{0,09}\text{Al}_{0,82})_5(\text{Si}_{6,33}\text{Al}_{1,67})_8\text{O}_{22}[\text{O}_{0,10}(\text{OH})_{1,90}]_2$

Amf-2 — $(\text{Ca}_{1,62}\text{Na}_{0,38}\text{K}_{0,08})_{2,08}(\text{Fe}_{2,12}\text{Mg}_{1,84}\text{Ti}_{0,10}\text{Al}_{0,93})_5(\text{Si}_{6,28}\text{Al}_{1,72})_8\text{O}_{22}[\text{O}_{0,09}(\text{OH})_{1,91}]_2$

Amf-3 — $(\text{Ca}_{1,67}\text{Na}_{0,39}\text{K}_{0,08})_{2,14}(\text{Fe}_{2,07}\text{Mg}_{1,96}\text{Ti}_{0,08}\text{Al}_{0,88})_5(\text{Si}_{6,30}\text{Al}_{1,70})_8\text{O}_{22}[\text{O}_{0,13}(\text{OH})_{1,87}]_2$

Gr-1 — $(\text{Ca}_{0,36}\text{Fe}_{2,03}\text{Mg}_{0,55}\text{Mn}_{0,04}\text{Ti}_{0,02})_3(\text{Al}_{1,99}\text{Fe}_{0,01})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

Gr-2 — $(\text{Ca}_{0,38}\text{Fe}_{2,03}\text{Mg}_{0,51}\text{Mn}_{0,06}\text{Ti}_{0,02})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

Gr-3 — $(\text{Ca}_{0,36}\text{Fe}_{2,03}\text{Mg}_{0,56}\text{Mn}_{0,05}\text{Ti}_{0,01})_3(\text{Al}_{1,99}\text{Fe}_{0,01})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

Рисунок 4. Диаграмма фазового соответствия для пары гранат-амфибол [15] (обозначения 1–3 см. таблицу 3)

Рисунок 5. Положение линий равных значений $K_{MgGr-Amf}$ на диаграмме T-P [15] (обозначения 1–3 см. таблицу 3)

Выводы

Таким образом, учитывая приведенные выше геологические, петрохимические и аналитические данные, можно предположить, что черносланцевые отложения сайтовской и игишской 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, черносланцевые толщи испытали региональ-

Примечание: сплошные линии — границы фаций, заштрихованное поле — поле устойчивости ставролита, точками показана тройная диаграмма And-Sill-Ky. Римскими цифрами обозначены фации: I — цеолитовая или пумпеллиит-пренитовая, II — пумпеллиит-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

Рисунок 6. Положение гранат-амфиболовых пар пород сайтовской толщи на петрогенетической диаграмме [15] (обозначения 1–3 см. таблицу 3)

ный метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации ($T = 550–580\text{ °C}$, $P = 6,8–7,2$ кбар, абиссальная зона глубинности). В дальнейшем, в период становления крупных Аргазинского, Кисегачского, Еланчиковского и Чашковского гранитоидных массивов, рассматриваемые отложения подверглись контактовому метаморфизму в условиях фации альмандиновых амфиболитов, что привело к выгоранию в них $C_{орг}$, а также резкому снижению потенциальной нефтегазоносности пород обрамления интрузий.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. 2-е изд. Серия Южноуральская. Лист N-41-VII (Миасс). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГУП «ВСЕГЕИ», 2003. 167 с.
2. Сначёв А.В., Пучков В.Н., Савельев Д.Е., Сначёв В.И. Геология Арамилско-Сухтелинской зоны Урала. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. 175 с.
3. Сначёв А.В., Сначёв В.И., Романовская М.А. Геология, петрогеохимия и рудоносность углеродистых отложений Ларинского купола (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2015. № 2. С. 58–67.
4. Парначёв В.П. Магматизм и осадконакопление в позднедокембрийской истории Южного Урала: дис. ... д-ра. геол.-мин. наук. Свердловск: 1987. 519 с.
5. 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. Уфа: Институт геологии УНЦ РАН, 2006. № 5. С. 86–104.
6. 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 1:1000000 (3-е поколение). Серия Уральская. Лист N-40 (Уфа). Объяснительная записка. СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2013. 512 с.
7. 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.
8. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. 272 с.
9. 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.
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 // Записки Всесоюзного Минералогического общества. 1974. Т. 103. № 1. С. 95–103.
11. 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.
12. Сначёв В.И. Условия метаморфизма пород саитовской свиты (Ильменогорско-Сысертский антиклинарий) // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академия наук Республики Башкортостан. 2020. № 27. С. 16–23.
13. Борнеман-Старынкевич И.Д. Руководство по расчёту формул минералов. М.: Наука, 1964. 224 с.
14. Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. М.: Недра, 1976. 287 с.

15. Термо- и барометрия метаморфических пород / Под ред. В.А. Глебовицкого. Л.: Наука, 1977. 207 с.

REFERENCES

1. Petrov V.I., Shalaginov A.E., Punegov B.N. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:200000. 2-e izd. Seriya Yuzhnoural'skaya. List N-41-VII (Miass). Ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 200000. 2nd Ed. Yuzhnouralskaya Series. Sheet N-41-VII (Miass). Explanatory Letter]. Moscow, Moskovskii filial FGUP «VSEGEI» Publ., 2003. 167 p. [in Russian].
2. Snachev A.V., Puchkov V.N., Savelev D.E., Snachev V.I. *Geologiya Aramil'sko-Sukhtelinskoi zony Urala* [Geology of the Aramil-Sukhtelinsk Zone of the Urals]. Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 2006. 175 p. [in Russian].
3. Snachev A.V., Snachev V.I., Romanovskaya M.A. *Geologiya, petrogeokhimiya i rudonosnost' uglepodistikh otlozhenii Larinskogo kupola (Yuzhnyi Ural)* [The Geology, Petrogeochemistry, and Ore Content of Carbonaceous Deposits from the Larinsky Dome (South Urals)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya — Moscow University Geology Bulletin*, 2015, No. 2, pp. 58–67. [in Russian].
4. Parnachev V.P. *Magmatizm i osadkonakoplenie v pozdnedokembriiskoi istorii Yuzhnogo Urala: dis. d-ra. geol.-min. nauk* [Magmatism and Sedimentation in the Late Precambrian History of the South Urals: Doct. Geological and Mineralogical Sci. Diss.]. Sverdlovsk, 1987. 519 p. [in Russian].
5. Savelev D.E., Snachev A.V., Puchkov V.N., Snachev V.I. *Petrogeokhimicheskie i geodinamicheskie osobennosti formirovaniya ordoviksko-rannesiluriiskikh bazal'tov vostochnogo sklona Yuzhnogo Urala* [Petrogeochemical and Geodynamic Features of the Formation of Ordovician-Early Silurian Basalts on the Eastern Slope of the Southern Urals]. *Geologicheskii sbornik* [Geological Collection]. Ufa, Institut geologii UNTs RAN Publ., 2006, No. 5, pp. 86–104. [in Russian].
6. Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu., Snachev V.I., Zhdanov A.V., Karimov T.R., Aidarov E.M., Masagutov R.Kh., Arslanova E.R. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1000000 (3-e pokolenie). 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]. St. Petersburg, FGBU «VSEGEI» Publ., 2013. 512 p. [in Russian].
7. Gorbachev O.V., Sozinov N.A. *Nekotorye petrokhimicheskie i geokhimicheskie aspekty tipizatsii uglepodistikh otlozhenii dokembriya* [Some Petrochemical and Geochemical Aspects of the Typification of Precambrian Carbonaceous Deposits]. *Problemy osadochnoi geologii dokembriya* [Problems of Sedimentary Geology of the Precambrian]. Moscow, Nauka Publ., 1985, pp. 55–62. [in Russian].
8. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geokhimiya chernykh slantsev* [Geochemistry of Black Shale]. Moscow-Berlin, Direkt-Media Publ., 2015. 272 p. [in Russian].
9. Buseck P.R., Beyssac O. From Organic Matter to Graphite: Graphitization. *Elements*, 2014, Vol. 10, No. 6, pp. 421–426. DOI: 10.2113/gselements.10.6.421.
10. Blyuman B.A., Dyakonov Yu.S., Krasavina T.N., Pavlov M.G.. *Ispol'zovanie termo- i rentgenograficheskikh*

kharakteristik grafitu dlya opredeleniya urovnya i tipa metamorfizma [The Use of Thermal and Radiographic Characteristics of Graphite to Determine the Level and Type of Metamorphism]. *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo obshchestva – Notes of the All-Union Mineralogical Society*, 1974, Vol. 103, No. 1, pp. 95–103. [in Russian].

11. Cilaev V.I., Smoleva I.V., Antoshkina A.I., Chaikovskii I.I. Opyt sopryazhennogo analiza izotopnogo sostava ugleroda i azota v uglerodistykh veshchestvakh raznogo proiskhozhdeniya [Experience in the Conjugate Analysis of the Isotopic Composition of Carbon and Nitrogen in Carbonaceous Substances of Different Origin]. *Materialy nauchnykh chtenii pamyati P.N. Chirvinskogo «Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii»* [Materials of Scientific Readings in Memory of P.N. Chirvinsky «Problems of Mineralogy, Petrography and Metallogeny»]. Perm, PGU Publ., 2012, No. 15, pp. 342–366. [in Russian].

12. Snachev V.I. Usloviya metamorfizma porod saitovskoi svity (Il'menogorsko-Sysertsksii antiklinorii) [Conditions of Metamorphism of Rocks of the Saitovskaya Suite (Ilmenogorsko-Sysertsksy Anticlinorium)]. *Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnym resursom Akademii nauk Respubliki Bashkortostan — Geology. The Bulletin of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 2020, No. 27, pp. 16–23. [in Russian].

13. Borneman-Starynkevich I.D. *Rukovodstvo po raschetu formul mineralov* [Mineral Formula Calculation Guide]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 224 p. [in Russian].

14. Perchuk L.L., Ryabchikov I.D. *Fazovoe sootvetstvie v mineral'nykh sistemakh* [Phase Matching in Mineral Systems]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 287 p. [in Russian].

15. *Termo- i barometriya metamorficheskikh porod* [Thermo- and Barometry of Metamorphic Rocks]. Ed. by V.A. Glebovitskogo. Leningrad, Nauka Publ., 1977. 207 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ ABOUT THE AUTHOR

Сначёв Александр Владимирович, канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией рудных месторождений, Институт геологии УФИЦ РАН г. Уфа, Российская Федерация

Aleksandr V. Snachev, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Head of Ore Field Laboratory, Institution of Geology UFRC RAS, Ufa, Russian Federation

e-mail: SAVant@rambler.ru