**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА ПОРОД
ЕРЕМКИНСКОЙ ТОЛЩИ (КОЧКАРСКИЙ АНТИКЛИНОРИЙ)****PHYSICAL AND CHEMICAL CONDITIONS
OF ROCKS METAMORPHISM OF YEREMKINSKY STRATUM
(KOCHKAR ANTICLINORIUM)****В. И. Сначёв****Vladimir I. Snachev**

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

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

А. В. Сначёв**Aleksandr V. Snachev**

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

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

М. В. Рыкус**Mikhail V. Rykus**

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum Technological
University, Ufa, Russian Federation

В статье приводится описание геологического строения еремкинской толщи, развитой в обрамлении Варламовского, Борисовского, Еремкинско-го и Санарского гранитно-мигматитовых куполов (Кочкарский антиклинорий). В состав толщи входят биотит-гранат-ставролитовые плагиогнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты, графит-слюдя-ные кварциты. В ассоциации с гранатом и биотитом в плагиогнейсах и кристаллических сланцах отмечены ставролит, кианит, силлиманит, андалузит, мусковит. Контакты с нижележащими образованиями неизвестны, а с перекрывающими мраморами кучинской толщи и кварцитами, кварцитопесчаниками александровской толщи — текто-нические. Датировки по Pb-Pb методу, полученные по цирконам, ото-бранным из пород еремкинской толщи, колеблются в пределах 523–1350 млн лет. Нижне-среднерифейский ее возраст принят в соот-ветствии с Южно-Уральской серийной легендой и в настоящее время надежно не охарактеризован радиологическими данными.

На основе изучения гранат-биотитового, гранат-ставролитового пара-генезисов, всесторонне исследованных экспериментально и широко представленных в породах еремкинской толщи, получены температу-ра и давление регионального метаморфизма ($T = 640\text{--}690\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 3,5\text{--}4,6\text{ кбара}$) и диафтореза ($T = 550\text{--}580\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 5,9\text{--}6,2\text{ кбара}$), что соответствует условиям куммингтонит-амфиболитовой и эпидот(альмандин)-амфиболитовой фаций.

Рассмотрение петрохимических особенностей амфиболитов и графитистых кварцитов позволило реконструировать палеогеодинамиче-ские и палеогеографические условия их образования. С учетом полу-ченных физико-химических параметров метаморфизма можно пред-положить, что породы еремкинской толщи сформировались в ниж-нем-среднем рифее в относительно глубоководных условиях в рифто-генно-континентальной геодинамической обстановке и в дальнейшем испытали диафторез в пограничных условиях эпидот-амфиболитовой и альмандин-амфиболитовой фаций. Связано это с формированием поздне-рифейско-вендских гранитно-гнейсовых куполов (Бори-совского, Варламовского, Еремкинско-го и Санарского), а также тер-мальным воздействием позднепалеозойских гранитоидов Санарского массива.

Ключевые слова

еремкинская толща;
Кочкарский антиклинорий;
биотит-гранат-ставролитовый
термобарометр;
амфиболиты;
графитистые кварциты;
метаморфизм

The article describes the geological structure of the Yeremkinsky stratum, developed in the frame of the Varlamovsky, Borisovsky, Yeremkinsky and Sanarsky granite-migmatite domes (Kochkarsky anticlinorium). The stratum includes biotite-garnet-staurolite plagiogneisses, crystalline schists, amphibolites, graphite-mica quartzites. Staurolite, kyanite, sillimanite, andalusite, muscovite are noted in association with garnet and biotite in plagiogneisses and schists. The contacts with the underlying formations are unknown, and with the overlapping marbles of the Kuchinsky stratum and quartzites, the quartzitic sandstones of the Alexandrovsky stratum are tectonic. Pb-Pb datings obtained from zircons selected from the rocks of the Yeremkin stratum range from 523–1350 Ma. Its Lower Middle Riphean age is accepted in accordance with the South Ural serial legend and is currently not reliably characterized by radiological data.

Based on a study of garnet-biotite, garnet-staurolite parageneses, comprehensively studied experimentally and widely represented in the rocks of the Yeremkin stratum, the temperature and pressure of regional metamorphism ($T = 640\text{--}690\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 3.5\text{--}4.6\text{ kbar}$) and diaphoresis ($T = 550\text{--}580\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 5.9\text{--}6.2\text{ kbar}$) were obtained, which correspond to the conditions of the cummingtonite-amphibolite and epidote(almandine)-amphibolite facies.

Consideration of the petrochemical features of amphibolites and graphitic quartzites made it possible to reconstruct the paleogeodynamic and paleogeographic conditions of their formation. Taking into account the obtained physicochemical parameters of metamorphism, it can be assumed that the rocks of the Yeremkin stratum were formed in the lower-middle Riphea in relatively deep-water conditions in the rift-continental geodynamic setting and later they experienced a diaphoresis in the epidote-amphibolite and almandine-amphibolite facies boundary conditions. This is due to the formation of the Late Riphean-Vendian granite-gneiss domes (Borisovsky, Varlamovsky, Yeremkin and Sanarsky), as well as the thermal effects of the Late Paleozoic granitoids of the Sanarsky massif.

Еремкинская толща (RF1-2er) широко распространена в пределах Восточно-Уральского поднятия в обрамлении Варламовского, Еремкинского, Борисовского, Пластовского и Санарского гранитоидных массивов и встречается в виде мигматизированных реликтов внутри последних (рисунок 1). Ее стратотип расположен в урочище Еремкино (лист N-41-XIII, Пласт, М 1:200 000). По данным геологов-съемщиков ОАО «Челябинскгеосъемка» (Пужаков и др., 2012ф), на основе материалов которых приводится описание геологии и петрографии пород еремкинской толщи, в ее составе отмечены: плагиогнейсы биотитовые, гранат-биотитовые, амфибол-биотитовые, амфиболовые; амфиболиты, кристаллосланцы слюдисто-плагиоклаз-кварцевые (часто с гранатом, ставролитом, кианитом, силлиманитом); прослой слюдистых, кианитовых и графитистых кварцитов. Последние представляют собой благоприятную геохимическую среду для образования благородно-металлического оруденения [1, 2]. Еремкинская толща практически не обнажена, но вскрыта многочисленными скважинами. Контакты с нижележащими образованиями неизвестны, а с перекрывающими мраморами кучинской

толщи, кварцитами, кварцитопесчаниками александровской толщи — тектонические.

Толща имеет трехчленное строение. Нижняя часть ее разреза представлена биотитовыми, гранат-биотитовыми плагиогнейсами и мигматизированными их разностями. Средняя — двуслюдяными, слюдяно-плагиоклаз-кварцевыми кристаллосланцами с редкими прослоями плагиоклаз-кварц-биотит-амфиболовых кристаллосланцев, кианитовых и графитистых кварцитов.

Верхняя часть толщи состоит преимущественно из кварц-биотит-плагиоклаз-амфиболовых кристаллосланцев, амфиболовых плагиогнейсов и амфиболитов с прослоями слюдистых и графитистых кварцитов. Границы между этими «пачками» в значительной мере условны.

В обрамлении гранитоидных массивов узкие блоки еремкинской толщи имеют сравнительно небольшие углы залегания — от субгоризонтальных (в Еремкинском куполе) до пологих ($30\text{--}35^{\circ}$), которые становятся более крутыми в зонах разрывных нарушений. Общая ее мощность достигает 2200 м.

Биотитовые плагиогнейсы имеют обычно серую, розовато-серую окраску, мелкозерни-

Key words

Yeremkin stratum;
Kochkarsky anticlinorium;
biotite-garnet-staurolite
thermobarometer; amphibolites;
graphitic quartzites;
metamorphism

Условные обозначения: 1 — осадочно-вулканогенные образования Сухтелинского синклинория; 2 — венд, александровская толща; 3 — венд-ордовик, кукушкинская толща; 4 — верхний рифей, светлинская толща; 5 — средний рифей, кучинская толща; 6 — протерозой, еремкинская толща; 7 — образования благодатской толщи (катаклазированные силикатно-карбонатные породы); 8 — метаультрамафиты; 9 — диориты, кварцевые диориты, габбро-диориты, габбро; 10 — граниты; 11 — плагиомигматиты; 12 — мигматиты гранитные; 13 — карбонатный меланж; 14 — катаклазит, тектониты нерасчлененные; 15 — стратиграфические и интрузивные границы; 16 — тектонические нарушения

Цифры в кружочках: гранитные массивы: 1 — Ключевской; 2 — Варламовский; 3 — Котликовский; 4 — Еремкинский; 5 — Борисовский; 6 — Санарский; 7 — Пластовский (Андреевский)

Рисунок 1. Схематическая геологическая карта Кочкарской площади. Составлена В.П. Муркиным и др. (1989ф)

стую структуру, хорошо развитую тонкоплитчатую отдельность. Иногда устанавливается реликтовая слоистость, выраженная зернистостью, характерной для осадочных ритмически построенных образований. В составе гнейсов присутствуют: биотит в количестве 10–20 %, плагиоклаз — 40–50 % и кварц — 20–30 %. Ставролит встречается редко, содержание его 1–3 %. Плагиоклаз в большинстве случаев отвечает олигоклазу № 20–24. Вместе с кварцем они представляют собой мозаичный гранобластовый агрегат. Биотит, иногда совместно с мусковитом, имеет полосчатое распределение. Окраска биотита чаще зеленая или буровато-зеленая. Гранат образует порфиробласты, обычно ситовидные. К числу акцессорных минералов относятся: рутил, ильменит, сфен, апатит, циркон, турмалин, ортит, магнетит. Иногда в плагиогнейсах наблюдаются реликтовые бластопсаммитовые структуры.

Слюдистые кристаллосланцы обладают лепидогранобластовыми структурами и полосчатыми текстурами. Основными минералами в них являются плагиоклаз, кварц, биотит, мусковит, иногда — гранат, ставролит, силлиманит, кианит, микроклин, рудные минералы, графит. Состав плагиоклаза варьируется от олигоклаза до андезин-лабрадора (№№ 21–48). Наряду с зелено-бурым биотитом в породе присутствует поздняя красно-коричневая слюда. Содержание мусковита в сланцах может достигать 20–30 %, что, скорее всего, связано с наложенными процессами.

Амфиболсодержащие породы имеют гранонематобластовые структуры и нередко — полосчатые текстуры, содержание амфибола в них колеблется от 15–30 % до 100 %. В составе пород присутствуют андезин № 30–35, биотит, кварц, микроклин, скаполит, карбонат, отмечены и амфиболовые сланцы с куммингтонитом. Редко встречается ярко-оранжевый и красно-коричневый амфибол, по химическому составу отвечающий калиевому рихтериту. Пироксенсодержащие сланцы структурно подобны амфиболовым, содержат пироксен диопсидового ряда. Графитистые кварциты на 90–95 % сложены кварцем, среднее содержание графита 0,5–3,0 %, редко — до 10 %. Кварциты содержат также кианит, биотит, мусковит, гранат, полевые шпаты, рудные минералы.

Биотитовые, биотит-амфиболовые плагиогнейсы и слюдистые кристаллосланцы еремкинской толщи имеют близкие содержания

кремнезема, щелочей, оксидов железа, титана и магния. Амфиболиты и биотит-амфиболовые плагиогнейсы отличаются от кристаллосланцев повышенными содержаниями оксида фосфора. По содержаниям вышеупомянутых оксидов они близки базальтам континентальных рифтов. Распределение РЗЭ относительно хондрита в образованиях толщи схоже с платобазальтами. Её отложения изменены на уровне амфиболитовой фации регионального метаморфизма, о чем свидетельствуют их минеральные составы. В результате диафтореза в отдельных участках образованы минеральные парагенезисы, соответствующие эпидот-амфиболитовой фации.

Возраст еремкинской толщи определялся различными методами. Датировки, полученные по циркону Pb-Pb методом, колеблются в пределах 523–1350 млн лет (Пужаков и др., 2012ф). Наиболее правдоподобным следует считать возраст формирования еремкинской толщи ранне-среднерифейским.

Одной из задач данной статьи является установление Р-Т условий и фаций метаморфизма пород еремкинской толщи на основе изучения биотит-гранатового и гранат-ставролитового парагенезисов, широко представленных среди плагиогнейсов, кристаллосланцев, слюдистых кварцитов и всесторонне изученных экспериментально [3, 4]. Составы минералов, отобранные из пород толщи (таблица 1), проанализированы силикатным анализом С.А. Ягудиной в

химической лаборатории Института геологии УФИЦ РАН (г. Уфа). Их формулы рассчитывались по известной методике И.Д. Борнеман-Старынкевич [5], а затем с помощью диаграммы фазового соответствия магнезиальностей парагенезисов биотит-гранат и гранат-ставролит [3] получены температуры и оценена глубина формирования пород. Составы биотитов, ставролитов и гранатов (альмандинового ряда) из восьми проб мало чем отличаются друг от друга. Следует отметить, что пробы № 1–3 отобраны из диафторированных пород, а пробы № 4–8 — неизмененных плагиогнейсов и кристаллических сланцев.

Обратимся к рисункам 2 и 3, на которых в координатах $X_{Mg}^{Gr} = Mg / (Mg + Fe + Mn)$ (значения мольных долей компонентов в биотите, ставролите и гранате) вынесены точки составов восьми пар и троек указанных метаморфических минералов (таблица 1).

Как видим, все ассоциации образуют два поля. Температуры образования для первого из них (№ 1–3) составляют 550–580 °С (гранат-биотитовый термометр) и 520–590 °С (гранат-ставролитовый термометр), а для второго (№ 4–8) — соответственно 640–690 °С и 580–610 °С.

Вместе с тем расчёт давления по известной температуре и коэффициенту $\ln K$, где $K = X_{Mg}^{Gr} / X_{Mg}^{Bi}$ [4], показал его значения соответственно 5,10–6,2 кбара (№ 1–3) и 3,5–4,6 кбара (№ 4–8) (рисунок 4). Если

Условные обозначения: кружочки — биотит-гранатовые пары (см. таблицу 1)

Рисунок 2. Диаграмма фазового соответствия X_{Mg}^{Gr} — X_{Mg}^{Bi} в породах еремкинской толщи [4]. 500–800 — изограды температур образования гранат-биотитовой ассоциации, °С

Условные обозначения: кружочки — ставролит-гранатовые пары (см. таблицу 1).

Рисунок 3. Диаграмма фазового соответствия X_{Mg}^{Gr} — X_{Mg}^{St} в породах еремкинской толщи [4]. 400–650 — изограды температур образования гранат-ставролитовой ассоциации, °С

вынести указанные данные на схему фаций регионального метаморфизма (рисунок 5), то приходим к выводу, что породы еремкинской толщи испытали вначале метаморфизм в условиях куммингтонитовых амфиболитов, а затем диафторез на границе фаций эпидотовых и альмандиновых амфиболитов.

Примечательно, что согласно рисунку 5, на котором показаны поля устойчивости кианита, андалузита, силлиманита, а также ставролита, в минеральной ассоциации диафторированных пород вместе с биотитом, ставролитом и гранатом отмечен кианит (нижний предел по давлению — 4 кбара), а в плагиог-

Таблица 1. Химический состав и формулы биотита (Bi), граната (Gr) и ставролита (St) пород еремкинской толщи (% масс.)

Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	X _{Mg} ^{Bi,Gr,St}
Bi-1	38,25	2,26	15,03	11,21	10,61	10,70	0,09	0,76	0,69	8,90	98,50	0,48
Gr-1	37,00	0,17	19,20	1,90	30,90	2,80	1,50	5,40	0	0	98,87	0,13
St-1	28,16	0,66	52,80	0,66	13,44	2,14	0	0,67	0	0	98,47	0,21
Bi-2	37,43	2,23	15,90	11,26	10,50	10,90	0,30	0,25	0,48	8,64	97,89	0,49
Gr-2	35,40	1,64	15,54	5,32	25,72	2,98	9,09	3,11	0	0	98,80	0,12
Bi-3	39,24	0,71	17,80	10,42	10,02	9,78	0,24	0,53	0,30	8,94	98,00	0,47
Gr-3	35,90	0,08	20,00	3,20	30,10	2,57	1,59	5,76	0	0	99,20	0,12
St-3	28,60	1,00	53,17	0,60	13,80	1,25	0,31	0,98	0	0	99,71	0,13
Bi-4	35,10	1,21	16,66	17,58	11,40	8,97	0,08	0,60	0,40	8,84	100,80	0,37
Gr-4	36,60	0,67	20,24	3,17	32,53	2,71	0,70	2,87	0	0	99,49	0,12
St-4	27,70	1,20	54,16	2,73	11,42	1,11	0,09	0,40	0	0	98,81	0,12
Bi-5	40,25	1,89	15,10	10,47	9,32	8,30	0,19	0,52	0,43	10,58	97,05	0,44
Gr-5	36,45	1,29	18,97	6,71	29,15	3,17	0,14	2,69	0	0	98,57	0,14
St-5	27,62	1,18	53,91	2,03	12,26	1,49	0,22	1,01	0	0	99,72	0,16
Bi-6	35,10	2,14	16,90	11,16	10,78	10,52	0,07	0,78	1,07	9,38	97,90	0,48
Gr-6	36,07	0,95	19,53	7,09	28,87	4,14	1,48	2,01	0	0	100,14	0,17
St-6	26,81	0,79	54,67	2,70	13,57	1,85	0	0,17	0	0	100,50	0,17
Bi-7	40,50	2,18	16,10	10,09	9,96	9,82	0,08	0,58	0,64	8,26	98,21	0,48
Gr-7	36,97	0,19	19,24	1,83	31,10	3,18	1,69	4,89	0	0	98,82	0,15
St-7	28,03	0,66	53,08	2,61	14,02	1,88	0,07	0,02	0	0	100,40	0,17
Bi-8	38,10	3,84	15,44	10,42	10,40	8,38	0,11	2,66	0,62	8,40	98,37	0,43
Gr-8	36,21	0,79	20,07	5,88	30,03	4,18	1,07	2,66	0	0	100,90	0,17

Bi-1 — $(K_{0,87}Na_{0,10}Ca_{0,06})_{1,03}(Mg_{1,23}Fe^{+2}_{0,68}Fe^{+3}_{0,65}Mn_{0,01}Ti_{0,13}Al_{0,30})_3(Si_{2,95}Al_{1,05})_4O_{10}[O_{0,75}(OH)_{1,25}]_2$

Gr-1 — $(Ca_{0,47}Fe^{+2}_{2,09}Mg_{0,34}Mn_{0,10})_3(Al_{1,84}Fe_{0,12}Ti_{0,01})_{1,97}Si_3O_{12}$

St-1 — $(Ca_{0,10}Mg_{0,45}Fe^{+2}_{1,45})_2(Al_{8,73}Fe^{+3}_{0,07}Ti_{0,07}Fe^{+2}_{0,13})_9(Si_{3,97}Al_{0,03})_4O_{20}(OH)_4$

Gr-2 — $(Ca_{0,28}Fe^{+2}_{1,78}Mg_{0,37}Mn_{0,64})_{3,07}(Al_{1,48}Fe_{0,33}Ti_{0,10})_{1,91}(Si_{2,95}Al_{0,05})_3O_{12}$

Bi-3 — $(K_{0,87}Na_{0,04}Ca_{0,04})_{0,95}(Mg_{1,11}Fe^{+2}_{0,64}Fe^{+3}_{0,60}Mn_{0,01}Ti_{0,04}Al_{0,60})_3(Si_{3,00}Al_{1,00})_4O_{10}[O_{0,73}(OH)_{1,27}]_2$

Gr-3 — $(Ca_{0,50}Fe^{+2}_{2,04}Mg_{0,31}Mn_{0,11})_{2,96}(Al_{1,83}Fe_{0,19}Ti_{0,01})_{2,03}(Si_{2,92}Al_{0,08})_3O_{12}$

St-3 — $(Ca_{0,15}Mg_{0,26}Fe_{1,61})_{2,02}(Al_{8,76}Fe^{+3}_{0,06}Ti_{0,11})_{8,93}Si_4O_{20}(OH)_4$

Bi-4 — $(K_{0,86}Na_{0,06}Ca_{0,05})_{0,97}(Mg_{1,02}Fe^{+2}_{0,73}Fe^{+3}_{1,01}Mn_{0,01}Ti_{0,07}Al_{0,18})_{3,02}(Si_{2,68}Al_{1,32})_4O_{10}[O_{0,93}(OH)_{1,07}]_2$

Gr-4 — $(Ca_{0,25}Fe^{+2}_{2,21}Mg_{0,33}Mn_{0,05}Fe^{+3}_{0,16})_{3,00}(Al_{1,92}Fe^{+3}_{0,03}Ti_{0,04})_{2,00}(Si_{2,98}Al_{0,02})_3O_{12}$

St-4 — $(Ca_{0,06}Mg_{0,23}Fe^{+2}_{1,34}Fe^{+3}_{0,28}Ti_{0,05}Mn_{0,01})_{1,96}(Al_{8,92}Ti_{0,08})_9(Si_{3,92}Al_{0,08})_4O_{20}(OH)_4$

Bi-5 — $(K_{1,07}Na_{0,06}Ca_{0,04})_{1,17}(Mg_{0,99}Fe^{+2}_{0,62}Fe^{+3}_{0,63}Mn_{0,01}Ti_{0,11}Al_{0,64})_{3,01}(Si_{3,22}Al_{0,78})_4O_{10}[O_{0,08}(OH)_{1,92}]_2$

Gr-5 — $(Ca_{0,23}Fe^{+2}_{2,01}Mg_{0,39}Mn_{0,01}Fe^{+3}_{0,36})_{3,00}(Al_{1,85}Fe^{+3}_{0,06}Ti_{0,08})_{2,00}Si_3O_{12}$

St-5 — $(Ca_{0,15}Mg_{0,31}Fe^{+2}_{1,43}Mn_{0,03}Fe^{+3}_{0,08})_2(Al_{8,75}Fe^{+3}_{0,13}Ti_{0,12})_9(Si_{3,87}Al_{0,13})_4O_{20}(OH)_4$

Bi-6 — $(K_{0,93}Na_{0,16}Ca_{0,07})_{1,16}(Mg_{1,22}Fe^{+2}_{0,70}Fe^{+3}_{0,65}Mn_{0,01}Ti_{0,13}Al_{0,29})_3(Si_{2,74}Al_{1,26})_4O_{10}[O_{0,83}(OH)_{1,17}]_2$

Gr-6 — $(Ca_{0,17}Fe^{+2}_{1,95}Mg_{0,50}Mn_{0,10}Fe^{+3}_{0,28})_{3,00}(Al_{1,79}Fe^{+3}_{0,14}Ti_{0,06})_2(Si_{2,93}Al_{0,07})O_{12}$

St-6 — $(Ca_{0,02}Mg_{0,38}Fe^{+2}_{1,57}Mn_{0,00}Fe^{+3}_{0,03})_2(Al_{8,65}Fe^{+3}_{0,25}Ti_{0,08})_{8,98}(Si_{3,72}Al_{0,28})_4O_{20}(OH)_4$

Bi-7 — $(K_{0,81}Na_{0,09}Ca_{0,05})_{0,95}(Mg_{1,12}Fe^{+2}_{0,63}Fe^{+3}_{0,58}Mn_{0,01}Ti_{0,12}Al_{0,54})_3(Si_{3,09}Al_{0,91})_4O_{10}[O_{0,43}(OH)_{1,57}]_2$

Gr-7 — $(Ca_{0,43}Fe^{+2}_{2,11}Mg_{0,39}Mn_{0,12})_{3,05}(Al_{1,81}Fe^{+3}_{0,11}Ti_{0,01})_{1,93}Si_3O_{12}$

St-7 — $(Ca_{0,00}Mg_{0,39}Fe^{+2}_{1,63}Mn_{0,01})_{2,03}(Al_{8,62}Fe^{+3}_{0,27}Ti_{0,07})_{8,96}(Si_{3,91}Al_{0,09})_4O_{20}(OH)_4$

Bi-8 — $(K_{0,85}Na_{0,09}Ca_{0,22})_{1,16}(Mg_{0,99}Fe^{+2}_{0,69}Fe^{+3}_{0,62}Mn_{0,01}Ti_{0,23}Al_{0,46})_3(Si_{3,02}Al_{0,98})_4O_{10}[O_{0,06}(OH)_{1,94}]_2$

Gr-8 — $(Ca_{0,23}Fe^{+2}_{2,01}Mg_{0,50}Mn_{0,07}Fe^{+3}_{0,19})_3(Al_{1,79}Fe^{+3}_{0,16}Ti_{0,05})_2(Si_{2,90}Al_{0,10})_3O_{12}$

Поля минералов: And — андалузит; Ky — кианит; Sill — силлиманит; Bi — биотит; Gr — гранат; Cord — кордиерит; KFsp — калиевый полевой шпат; Qu — кварц; Hy — гиперстен

Рисунок 4. Диаграмма P-T для определения давления по T и lnK в породах еремкинской толщи (точки 1–8, см. таблицу 1) [4]

нейсах и кристаллических сланцах, метаморфизованных в условиях куммингтонитовых амфиболитов, андалузит (№ 4–6) или силлиманит (№ 7, 8). Согласно В.В. Федькину [6], в породах с избытком K_2O , SiO_2 и Al_2O_3 , к числу которых относятся образования еремкинской толщи, поле устойчивости ставролита ограничено температурами 475–625 °C и давлением 2–10 кбар. Для рассматриваемых нами пород ставролит является вполне устойчивым метаморфическим минералом.

Определенный интерес для реконструкции палеогеодинамических и палеогеографических условий формирования пород еремкинской толщи представляет рассмотрение петро-

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 — эпидиотовых амфиболитов; VII — альмандиновых амфиболитов; VIII — куммингтонитовых амфиболитов; IX — гранулитовая

Рисунок 5. Положение гранат-биотитовых пар (см. таблицу 1) пород еремкинской толщи на петрогенетической диаграмме [4]

химических особенностей амфиболитов [7] и графитистых кварцитов, образование которых связано с региональным и контактовым метаморфизмом соответственно базальтов и осадочных отложений. Основой для этого послужили силикатные анализы пород, приведенные в таблицах 2 и 3.

Как следует из рисунка 6, а, б, среди ниже-среднерифейских основных эффузивов отмечены только толеитовые и субщелочные разновидности. Лишь одна проба попала в известково-щелочное поле. Составы амфиболитов на диаграммах TiO_2 — (K_2O+Na_2O) и TiO_2 — $Al_2O_3/(FeO+Fe_2O_3+MgO)$ (рисунок 6, в, г) расположились следующим образом —

Таблица 2. Химический состав амфиболитов еремкинской толщи

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
46,12	2,54	16,35	11,07	3,69	0,55	5,71	7,34	2,45	0,25	0,11	0,62	99,83
46,87	2,98	14,02	5,37	11,74	0,50	6,38	8,69	1,76	0,29	0,31	0,74	99,65
47,93	1,54	13,04	3,33	9,99	0,32	8,34	11,33	1,02	0,85	0,13	0,79	98,61
49,13	2,04	16,01	3,00	7,24	0,18	7,30	7,92	0,83	3,45	0,45	1,60	99,25
49,23	2,40	15,25	4,04	7,23	0,16	4,76	12,69	3,12	0,36	0,38	1,00	100,26
51,36	3,40	17,65	3,78	6,55	0,12	2,18	4,90	4,90	0,25	0,79	3,00	99,15
52,63	2,62	14,30	6,70	7,66	0,63	4,92	6,49	3,75	0,18	0,32	0,61	100,81
47,93	1,54	13,04	3,31	9,99	0,32	8,34	11,33	1,02	0,85	0,133	0,79	99,60
46,38	1,64	12,12	4,15	9,13	0,07	13,26	11,00	0,94	0,20	0,11	1,88	100,88
51,84	1,03	16,65	2,84	5,30	0,22	8,80	5,80	2,38	0,33	0,348	3,14	98,68

Таблица 3. Химический состав углеродистых пород Кочкарского антиклинария

№№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	S	ппп	сумма
1	87,57	0,14	2,57	0,11	1,05	3,05	0,36	0,03	0,53	0,77	1,53	0,4	0,25	2,50	100,22
2	88,62	0,13	3,38	0,07	0,98	1,25	0,39	0,02	0,55	0,83	0,28	1,32	0	2,96	99,47
3	92,40	0,10	2,20	0,05	1,47	0,94	0,52	0,03	0,33	0,50	0,16	0,44	0,27	1,26	99,93
4	43,80	0,47	14,32	2,44	3,06	17,41	3,25	0,17	2,38	2,19	0,37	5,06	2,06	8,90	98,77
5	52,51	0,72	25,71	1,40	1,45	0,85	1,78	0,02	1,31	8,40	0,08	0,88	0,15	5,26	99,49
6	94,68	0,05	0,64	0,05	0,50	1,23	0,47	0,01	0,13	0,35	0,02	0,88	0,10	1,70	99,79
7	72,84	0,40	8,58	1,38	1,09	0,56	1,88	0,05	0,18	3,06	0,14	0,40	0,69	10,12	100,28
8	62,26	0,66	12,78	2,50	4,59	3,90	3,71	0,09	1,00	3,01	0,39	0,40	1,64	4,64	99,53
9	81,70	0,37	4,94	0,18	1,87	2,09	1,59	0,07	0,55	1,09	0,84	0,55	0,48	3,52	98,81
10	86,50	0,20	4,03	0,14	1,21	0,84	0,83	0,03	0,36	1,04	0,05	0,40	0,10	4,32	99,55
11	81,00	0,20	6,72	0,23	3,71	2,61	1,41	0,07	1,30	0,93	0,18	1,10	0,68	1,54	100,02
12	78,48	0,26	6,89	1,49	1,86	3,39	1,24	0,10	0,14	1,60	1,65	0,40	0,10	3,44	100,55
13	73,74	0,34	7,11	0,75	0,98	4,96	1,60	0,04	0,64	2,12	1,97	2,86	0,10	5,46	99,71
14	82,60	0,25	4,56	1,11	1,13	2,36	0,97	0,06	0,46	1,00	0,56	0,40	0,40	3,92	98,98
15	82,88	0,22	5,22	1,31	0,95	1,53	0,97	0,06	0,19	1,17	0,70	0,40	0,52	4,24	99,44
16	81,06	0,28	6,52	1,28	1,55	0,86	1,40	0,03	1,00	1,00	0,16	0,66	0,54	4,08	99,22
17	41,50	2,52	24,20	3,56	6,44	2,88	3,60	0,08	0,54	5,13	0,20	3,08	1,00	8,54	99,29
18	41,56	1,62	23,01	2,37	6,20	1,51	2,65	0,04	1,71	2,08	0,19	0,88	0,10	17,34	100,28
19	59,94	0,74	17,29	1,77	5,01	1,94	3,40	0,06	1,65	2,64	0,17	0,44	0,50	4,52	99,13
20	49,94	0,75	15,74	1,66	5,50	8,78	3,74	0,19	2,32	2,50	0,20	5,06	0,49	8,12	99,44

Примечания: 1–3 — еремкинская толща; 4 — кучинская толща; 5 — кукушкинская толща; 6–20 — александровская толща.

наиболее высокотитанистые (более 2 % TiO₂) породы занимают область в пределах поля эпиплатформенных континентальных рифтов, а относительно низкотитанистые (1,03–1,64 % TiO₂) — по его левой периферии [8]. Данный вывод можно считать предварительным. Для более точной реконструкции геодинамических условий образования основных эффузивов еремкинской толщи нужна бо́льшая выборка пород и изучение в них редкоземельных и малых элементов.

Углеродистые отложения представляют собой весьма информативные породы для реконструкции палеогеографических условий их накопления. Анализ (таблица 3), нанесенные на диаграмму A-S-C [9], показывают, что фигуративные точки еремкинской толщи образуют ряд по оси S от 1380 до 1440 единиц и относятся к кремнисто-углеродистой формации (рисунок 7). Для сравнения приведем результаты по другим углеродистым породам Кочкарского антиклинария: кучинские отложения попали в поле карбонатно-углеродистой формации, кукушкинские — терригенно-углеродистой, александровские — преимущественно кремнисто-углеродистой формаций. Наиболее важным является параметр S, связанный обратно пропорциональной зависимостью с долей терригенной примеси в осадках, которая, в свою очередь, служит основным

индикатором удаленности участка седиментации от береговой линии водного бассейна.

Графитистые плагиогнейсы и кристаллические сланцы еремкинской толщи имеют незначительную долю терригенной примеси в их составе, что с большой долей уверенности позволяет отнести рассматриваемые породы к относительно глубоководным. Близки к ним и слюдисто-графитистые сланцы александровской толщи, а вот кучинские и кукушкинские породы явно формировались в мелководных условиях.

Этот вывод подтверждается и другими данными, в частности расчётными параметрами FeO/Fe₂O₃ (закисный модуль), TiO₂/Al₂O₃ (титановый модуль) и Fe/Mn. Известно, что для осадочных пород, накапливающихся в глубоководном бассейне с восстановительной обстановкой, характерны величины FeO/Fe₂O₃ > 1, Fe/Mn < 40 и $CA_{Al_2O_3} < (-10C_{TiO_2}) + 8,5$. Для мелководного бассейна с окислительными условиями они составляют: FeO/Fe₂O₃ < 1, Fe/Mn = 40–160 и $CA_{Al_2O_3} > (-10C_{TiO_2}) + 8,5$. Графитистые плагиогнейсы и кристаллические сланцы еремкинской толщи (таблица 3) имеют величины данных параметров соответственно в пределах: 9,5–29,0 ед.; 35–49 ед. и 0,04–0,05 ед. (последний — TiO₂/Al₂O₃ — удовлетворяет неравенству $CA_{Al_2O_3} < (-10C_{TiO_2}) + 8,5$). Для остальных

Поля составов базальтов: (а, б) — Щ — щелочное, СЩ — 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 — эпигорных континентальных рифтов, IV — островных дуг. Поля составов базальтов заимствованы из работы Д.Е. Савельева и др. [7, 8].

Рисунок 6. 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 TiO_2 — al' (г) для амфиболитов еремкинской толщи

Условные обозначения: 1–4 — толщи: 1 — еремкинская, 2 — кучинская, 3 — кукушкинская, 4 — александровская.

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.

Рисунок 7. Типизация углеродистых пород Кочкарского антиклинария с помощью диаграммы О. В. Горбачёва, Н. А. Созинова [9]

ных толщ выводы полностью совпадают с таковыми диаграммы А-S-C.

Выводы

1. Учитывая приведённые выше данные по условиям образования и преобразования осадочных и вулканогенных пород еремкинской толщи, можно предположить, что они сформировались в нижнем-среднем рифее в глубоководных условиях и рифтогенно-континентальной геодинамической обстановке.

2. В дальнейшем породы испытали метаморфизм в условиях куммингтонит-амфибо-

литовой фации при температурах 640–690 °С и давлении 3,5–4,6 кбара, а затем подверглись диафторезу при $T = 550–580$ °С и $P = 5,9–6,2$ кбара (пограничные условия эпидот-амфиболитовой и альмандин-амфиболитовой фаций).

3. Связано это с формированием поздне-рифейско-вендских гранитно-гнейсовых куполов (Борисовского, Варламовского, Еремкинского и Санарского), а также термальным воздействием позднепалеозойских гранитоидов Санарского массива [10].

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рыкус М.В., Сначёв В.И., Кузнецов Н.С., Савельев Д.Е., Бажин Е.А., Сначёв А.В. Рудоносность дунит-гарцбургитовой и черносланцевой формаций пограничной зоны между Южным и Средним Уралом // Нефтегазовое дело. 2009. Т. 7. №2. С. 17–27.

2. Сначёв В.И., Сначёв А.В. Закономерности размещения золоторудных проявлений в углеродистых отложениях Белорецкого метаморфического комплекса (Южный Урал) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2014. №2. С. 79–87.

3. Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. М.: Недра, 1976. 287 с.

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

5. Борнеман-Старынкевич И.Д. Руководство по расчёту формул минералов. М.: Наука, 1964. 224 с.

6. Федькин В.В. Ставролит. М.: Наука, 1975. 250 с.

7. Савельев Д.Е., Сначёв А.В., Пучков В.Н., Сначёв В.И. Петрогеохимические и геодинамические особенности формирования ордовикско-раннесилурийских базальтов восточного склона Южного Урала. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2006. С. 86–104.

8. Савельев Д.Е., Пучков В.Н., Ардисламов Ф.Р., Сначёв В.И. Вулканогенные породы машакской свиты среднего рифея: геология и петрогеохимия // Литосфера. 2009. №4. С. 3–26.

9. Горбачев О.В., Созинов Н.А. Некоторые петрохимические и геохимические аспекты типизации углеродистых отложений докембрия. М.: Наука, 1985. С. 46–57.

10. Демин Ю.И., Сначёв В.И. Тепловые поля Ахунского гранитного массива и закономерности размещения в них оруденения // Доклады Академии наук СССР. 1981. Т. 261. №1. С. 152–156.

REFERENCES

1. Rykus M.V., Snachev V.I., Kuznecov N.S., Sav'el'ev D.E., Bazhin E.A., Snachev A.V. Rudonosnost' dunit-garcburgitovoj i chernoslancevoj formacij pogranichnoj zony mezhdru Yuzhnyj i Srednim Uralom [Ore Bearing Capacity of the Dunite-Harzburgerite and Black Shale Formations of the Border Zone between the South and Middle Urals]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2009, Vol. 7, No. 2, pp. 17–27. [in Russian].

2. Snachev V.I., Snachev A.V. Zakonomernosti razmeshcheniya zolotorudnyh proyavlenij v uglerodistykh otlozheniyah Beloreckogo metamorficheskogo kompleksa (Yuzhnyj Ural) [Patterns of Placement of Gold Ore Manifestations in Carbon Deposits of the Beloretsk Metamorphic Complex (South Urals)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya — Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, No. 2, pp. 79–87. [in Russian].

3. Perchuk L.L., Ryabchikov I.D. *Fazovoe sootvetstvie v mineral'nyh sistemah* [Phase Matching in Mineral Systems]. Moscow, Nedra, 1976. 287 p. [in Russian].

4. *Termo- i barometriya metamorficheskikh porod* [Thermo- and Barometry of Metamorphic Rocks]. Leningrad, Nauka, 1977. 207 p. [in Russian].

5. Borneman-Starynkevich I.D. *Rukovodstvo po raschetu formul mineralov* [Guidelines for the Calculation of Mineral Formulas]. Moscow, Nauka, 1964. 224 p. [in Russian].

6. Fed'kin V.V. *Stavrolit* [Stauroilite]. Moscow, Nauka, 1975. 250 p. [in Russian].

7. Sav'el'ev D.E., Snachev A.V., Puchkov V.N., Snachev V.I. *Petrogeohimicheskie i geodinamicheskie osobennosti formirovaniya ordoviksko-rannesilurijskikh bazal'tov vostochnogo sklona Yuzhnogo Urala* [Petrogeochemical and Geodynamic Features of the Formation of the Ordovician-Early Silurian Basalts of the Eastern Slope of the Southern Urals]. Ufa, DizajnPoligrafServis, 2006. pp. 86–104. [in Russian].

8. Sav'el'ev D.E., Puchkov V.N., Ardislamov F.R., Snachev V.I. *Vulkanogennye porody mashakskoj svity srednego rifeja: geologiya i petrogeohimiya* [Volcanic Rocks of the Mashak Formation of the Middle Riphean: Geology and Petrogeochemistry]. *Litosfera — Lithosphere*, 2009, No. 4, pp. 3–26. [in Russian].

9. Gorbachev O.V., Sozinov N.A. *Nekotorye petrohimicheskie i geohimicheskie aspekty tipizacii uglerodistykh otlozhenij dokembriya* [Some Petrochemical and Geochemical Aspects of the Typization of Precambrian Carbon Deposits]. Moscow, Nauka, 1985. pp. 46–57. [in Russian].

10. Demin Yu.I., Snachev V.I. *Teplovye polya Ahunovskogo granitnogo massiva i zakonomernosti razmeshcheniya v nih orudeneniya* [Thermal Fields of the Akhunov Granitic Massif and Patterns of Placement of Mineralization in them]. *Doklady Akademii nauk SSSR — Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1981, Vol. 261, No. 1, pp. 152–156. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

Сначёв Владимир Иванович, д-р геол.-минерал. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт геологии УФИЦ РАН. г. Уфа, Российская Федерация

Vladimir I. Snachev, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of Geology UFRS RAS, Ufa, Russian Federation

e-mail: SAVant@inbox.ru

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, Institute of Geology UFRS RAS, Ufa, Russian Federation

e-mail: SAVant@rambler.ru

Рыкус Михаил Васильевич, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры «Геология и разведка нефтяных и газовых месторождений», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Mikhail V. Rykus, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Assistant Professor of Geology and Oil and Gas Field Exploration Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: rykusmihail@mail.ru