

К. С. ИВАНОВ, Ю. В. ЕРОХИН, В. В. ХИЛЛЕР (ИГГ УрО РАН),
Н. В. РОДИОНОВ (ВСЕГЕИ), П. А. СЕРОВ (ГИ КНЦ РАН)

К проблеме докембрия восточного склона Урала (о возрасте и природе селянkinской толщи ильменогорской зоны)

Среди гнейсо-мигматитовых комплексов восточного склона Урала типовым является ильменогорский, в основании которого выделяется селянkinская толща амфиболитовой фации. Ее возраст считался раннепротерозойским. Изучены минералогия и геохронология опорного разреза толщи в Ильменском заповеднике. Установлено, что гнейсы сформировались как метаморфические породы не в докембрии, а в палеозое. На примере цирконов показано, что древний докембрийский материал (≈ 2 млрд лет) в составе этих пород отмечается лишь в виде окатанных зерен. Выполнено Th-U-Pb датирование монацита, получены две изохроны (323 ± 28 и 275 ± 22 млн лет), определяющие возраст метаморфизма гнейсов. Sm-Nd изохроны также обнаруживают этапы метаморфизма (468 и 276 млн лет). Метаморфиты располагаются восточнее Главного Уральского разлома (в среднем палеозое зоны субдукции), они представляют собой глубинные части островной дуги. Ar-Ar определение возраста по биотиту (242 млн лет) указывает на выведение метаморфических комплексов на уровень верхней коры при постколлизиином растяжении Урала.

Ключевые слова: *гнейсы, восточный склон Урала, цирконы, U-Pb и Sm-Nd датирование, монациты, химическое датирование, возраст, палеозой.*

K. S. IVANOV, YU. V. EROKHIN, V. V. KHILLER (IGG UB RAS),
N. V. RODIONOV (VSEGEI), P. A. SEROV (GI KSC RAS)

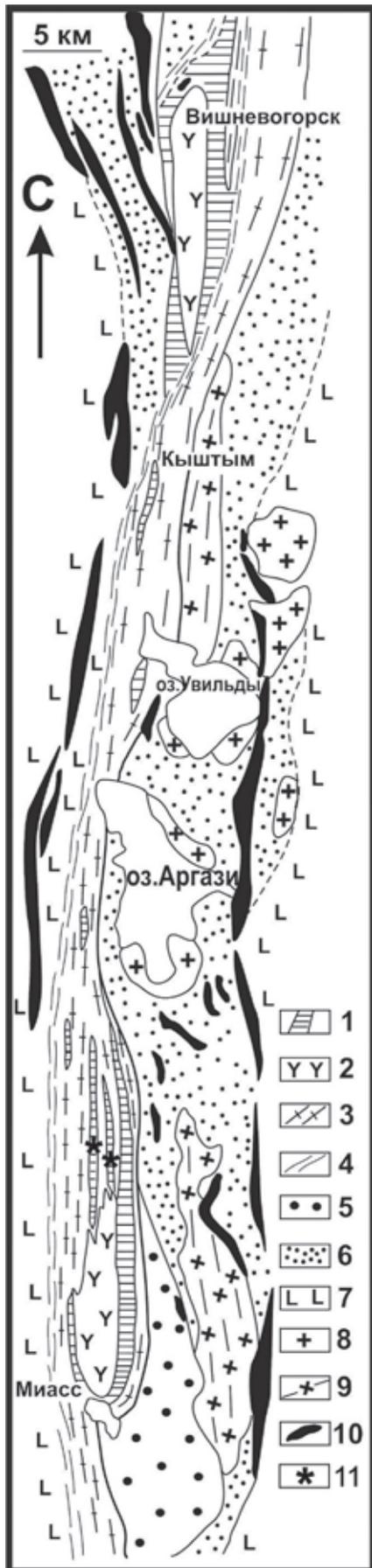
Concerning the problem of Precambrian of the Urals eastern slope (about age and nature of the Ilmenogorsk zone of the Selyankinskaya series)

Among gneiss-magmatic complexes of the Urals eastern slope the type one is the Ilmenogorsk complex, at the basement of which one can distinguish the gneiss Selyankinskaya series of amphibolite facies. Its age has been considered as Early Proterozoic. Mineralogy and geochronology of the series key section in the N-W part of the Ilmen state reservation have been studied. New data shows that these gneisses have been formed as metamorphic rocks not in Precambrian but in Paleozoic. On the example of zircons it was shown that ancient material (~ 2 Ga) in these rocks composition has been noted merely in the shape of rounded grains (possibly, these are the products of washout and removal from the Russian platform). The monazite Th-U-Pb dating has been fulfilled, two isochrones (323 ± 28 and 275 ± 22 Ma), determining the gneiss metamorphism age, have been obtained. Sm-Nd isochrones on gneiss and minerals from it also display metamorphism stages (468 and 276 Ma) of ancient detrital material. Bearing in mind that the Ilmenogorsk zone metamorphites are situated directly east of the Main Uralian fault zone (in its hanging wing) being in Middle Paleozoic the subduction zone, these metamorphic complexes, possibly, present themselves deep parts of an island arc. In the same gneisses Ar-Ar determination on biotite (242 Ma) dates the moving of metamorphic complexes to the level of upper crust during the post-collision sublatitudinal extension of the Urals.

Keywords: *gneisses, eastern slope of the Urals, zircons, U-Pb and Sm-Nd dating, monazites, chemical dating, age, Paleozoic.*

Проблемы геологии, стратиграфии и природы докембрийских образований восточного склона Урала интенсивно обсуждаются в геологической литературе уже более 70 лет [1–3, 7–10, 12, 15, 20, 24, 29, 31, 32]. Главная из них – объемы и вообще наличие допалеозойских образований. К протерозою и рифею на восточном склоне Урала обычно относят метаморфизованные комплексы неясного возраста, соседствующие с менее метаморфизованными фаунистически датированными толщами палеозоя. Контакты между ними, хотя описываются обычно как трансгрессивные, стратиграфически несогласные и т. п., фактически, как правило, тектонические (или задернованные). Более интенсивно метаморфизованные комплексы

(амфиболитовая фация и выше) обычно относят к протерозою или раннему рифею, а комплексы эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций зачастую считают позднерифейскими. Такие концепции, присутствующие в явной или неявной форме в ряде статей, монографий и геологических карт, есть главным образом вследствие использования «правила»: *чем метаморфизованней, тем древнее*. Однако достаточно очевидно, что разница в степени метаморфизма тех или иных комплексов не дает «возрастной» информации, а свидетельствует лишь об их формировании или преобразовании при разных РТ условиях, которые могли существовать одновременно в разных геодинамических обстановках.



Представления о рифейском возрасте метаморфических комплексов Урала часто подкрепляются их гипотетическими сравнениями с разрезом Башкирского поднятия западного склона Урала (или же с «разрезом» фундамента Русской платформы [15]), другими косвенными соображениями, а также находками и определениями в допалеозойских толщах различных микрофитоорганических остатков, «следов ползания» и т. п. Определения возраста по таким данным имеют крайне сомнительную стратиграфическую ценность и к ним следует, по всей видимости, добавлять: «не древнее...». Так, одному из авторов этой статьи удалось обнаружить конодонты разных ярусов палеозоя в ряде точек, где ранее отмечались микрофитолиды четвертого (юдомского) комплекса рифея [6]. Абсолютный возраст допалеозойских метаморфизованных толщ, установленный разными методами, как правило, дают цифры палеозоя, что обычно недоказательно интерпретируется как результат «омоложения». Представления о допалеозойском возрасте метаморфических комплексов восточного склона Урала, поддерживаемые большинством геологов, вошли в стратиграфические схемы [26] и легенды геологических карт, хотя есть мнения и о палеозойском возрасте этих образований [4–6, 27, 28, 30].

Среди метаморфических гнейсо-мигматитовых комплексов восточного склона Урала наиболее типичен и хорошо изучен ильменогорский комплекс, в основании которого выделяется селяннинская толща, где преобладает амфиболитовая фация метаморфизма. Возраст раннего этапа метаморфизма на основании термоизохронного датирования цирконов считался не менее 2,3 млрд лет [12]. Ранее А. А. Краснобаев [11] предложил весьма правильную идею разделить вообще все докембрийские датировки абсолютного возраста на три группы – от крайне ненадежных, «ориентировочных» до «достоверных» и самых надежных «реперных достоверных». По его мнению, к категории «достоверных» для докембрийских датировок на восточном склоне Урала принадлежала лишь одна датировка именно селяннинской толщи с возрастом 1820 ± 70 млн лет [11].

Метаморфические комплексы области сочленения Южного и Среднего Урала претерпели сложную эволюцию, отдельные этапы которой трактуются исследователями по-разному [4, 12, 17, 35]. В заключительной стадии геолого-геодинамической истории метаморфических комплексов региона выделяются [35] следующие главные этапы: коллизия ≈ 370 – 330 , трансгрессия ≈ 330 – 270 , ограниченное постколлизийное растяжение региона ≈ 255 – 240 млн лет.

Селяннинский комплекс, представленный преимущественно мигматизированными гнейсами, закартирован в осевой части Ильменогорской структуры [17]. Породы комплекса слагают субмеридиональную крутозалегающую пластину шириной до 2 км в Ильменском хребте. Толща существенно гнейсовая, содержит до 20 % амфиболитов, сложена плагиогнейсами (биотитовыми, гранат-биотитовыми, силлиманит-гранат-биотитовыми), плагиомигматитами, графитистыми кварцито-гнейсами и амфиболитами. Породы метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации и развития щелочных метасоматитов – фенитов различного состава [21]. Некоторые исследователи отмечали здесь наличие метаморфитов гранулитовой фации [23], но большинство (как и мы) придерживается мнения, что достигнутый в Ильменогорской зоне максимум метаморфизма

Рис. 1. Схема геологического строения и метаморфизма района Ильменских и Висневых гор [25]

1–4 – Ильменогорско-Висневогорский сегмент сдвиговой зоны: 1 – амфиболит-гнейсово-плагиомигматитовый селяннинский комплекс (Ar–Pt₁), 2 – массивы миасситов (O₂), 3 – высокобарические среднетемпературные blastsмилониты гранитоидного и сиенитового состава (P₂–T₁), 4 – низкотемпературные blastsмилониты Кыштымского сдвига-надвига; 5–7 – среднепалеозойские метаморфические комплексы обрамления Ильменогорско-Висневогорской зоны: 5 – еланчиковский комплекс плагиосланцев и мигматитов инъекционного типа, 6 – сайтовский комплекс амфиболовых, биотитовых и углитографитистых сланцев и кварцитов, 7 – зеленосланцевые осадочно-вулканогенные комплексы Западно-Магнитогорской и Арамилско-Сухтелинской зон; 8 – увильдинский монцодиорит-гранитный комплекс (P₃); 9 – гнейсовидные граниты кисегачского комплекса (P₂); 10 – метагипербазиты; 11 – места отбора проб

Химический состав (в мас.%) граната, биотита и плагиоклаза из гнейсов

Компонент	Гранат			Биотит			Плагиоклаз	
	центр зерна	промежуточная зона	край зерна	центр зерна	промежуточная зона	край зерна	центр зерна	край зерна
SiO ₂	36,69	36,36	35,83	34,49	33,91	34,11	63,22	63,41
TiO ₂	0,04	0,01	0,01	2,00	1,95	1,86	0,02	0,02
Cr ₂ O ₃	0,06	0,05	0,06	0,10	0,09	0,06	—	0,03
Al ₂ O ₃	21,16	20,78	20,50	17,40	17,55	17,42	21,71	22,32
FeO	33,37	34,29	34,52	19,19	19,26	18,88	0,06	—
MnO	3,24	3,63	4,52	0,10	0,07	0,09	—	—
MgO	4,06	3,53	2,80	10,51	10,24	10,50	—	—
CaO	0,98	1,01	1,00	—	—	0,01	3,47	3,48
Na ₂ O	0,02	0,05	0,04	0,15	0,12	0,13	9,74	9,57
K ₂ O	—	—	0,03	9,07	9,18	9,23	0,32	0,22
F	—	—	—	0,28	0,15	0,34	—	—
Сумма	99,62	99,71	99,31	93,30	92,53	92,63	98,53	99,06

Примечание. Здесь и далее микрозондовые анализы (табл. 1–5) выполнены на Cameca SX 100 (ИГГ УрО РАН, аналитик В. В. Хиллер).

соответствует верхней части амфиболитовой фации. Возраст этих пород считается раннепротерозойским [13, 14], имеют место отдельные палеозойские датировки (426 ± 13 млн лет и др.).

Селянkinский комплекс (рис. 1) изучался нами в северо-западной части Ильменского государственного заповедника ($55^{\circ}12.247'$ с.ш., $60^{\circ}13.116'$ в.д., отсюда наши определения возраста) недалеко от Дурнева перевала (это опорный разрез комплекса), а также в 1 км юго-западнее д. Селянкино, западнее трассы Миасс – Карабаш ($55^{\circ}13.314'$ с.ш., $60^{\circ}11.106'$ в.д.). Для геохронологических исследований были отобраны типичные плагиогнейсы гранат-биотит-кварц-плагиоклазового состава. Более молодые гранитоиды, прорывающие гнейсы, в данной работе не описываются.

Минералогия и петрография пород селянkinской толщи достаточно хорошо изучены [17]. Плагиогнейсы представлены мелко- и среднезернистыми порфиробластовыми полосчатыми породами. Они постепенно переходят к биотитовым кристаллосланцам, а также мигматитам по плагиогнейсам и сланцам. В наименее измененных плагиогнейсах содержание граната и биотита примерно одинаково (до 10–15 %). В породах также встречаются кварц, кианит, силлиманит, мусковит, калиевый полевой шпат и графит. Акцессорные минералы – апатит, турмалин, ильменит, рутил, сфен, брукит, анатаз, пирит, ортит, шеелит, циркон, монацит, шпинель, золото, молибденит, галенит, эпидот [22].

Полученные нами результаты по химизму гранатов близки к ранее опубликованным данным [16]. Минерал по химическому составу (табл. 1) пересчитывается на альмандин с относительно высоким содержанием миналов пироба (от 18 % в центре зерен до 11 % к краю) и спессартина (от 6 % в центре зерен до 10 % к краю), а также устойчиво низким присутствием минала гроссуляра (до 3–4 %). В гранате наблюдается регрессивный тренд зональности с падением к краю зерен магния и резким нарастанием марганца и железа. По данным [16], условия образования пород от

740 °С при 6,0 кбар (центральная часть зерен альмандина) до 590 °С при 3,5 кбар (для краевых зон граната). По нашим расчетам (с использованием гранат-биотитового геотермометра [33]), температура изменялась от 675 до 615 °С, от центра к краю зерен альмандина.

Биотит из этих же гнейсов слагает как самостоятельные лейсты, так и включения в гранате (рис. 2). Он характеризуется устойчивым химическим составом (табл. 1), попадающим при кристаллохимическом пересчете на границу аннита и флогопита с небольшим преобладанием железистой составляющей. Иными словами, минерал относится к сильно магнезиальному анниту. В слюде практически не отмечается какой-либо зональности, только к краю индивидов незначительно падает содержание титана (TiO₂ от 2 до 1,4 мас. %). Полученные результаты в основном хорошо соотносятся с составами биотита, опубликованными немного ранее [18].

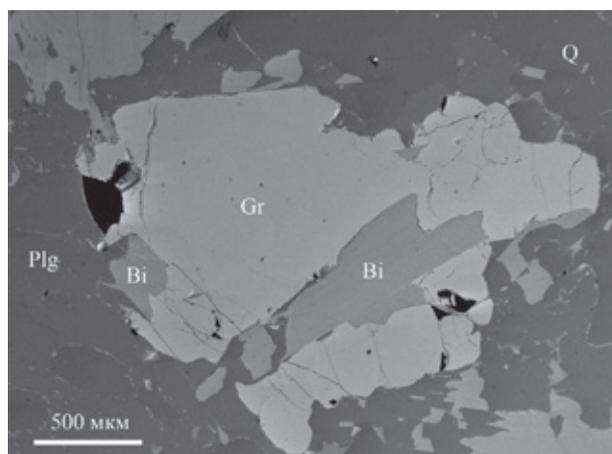


Рис. 2. Включение лейсты биотита (Bi) в индивиде граната (Gr) в ассоциации с зернами плагиоклаза (Plg) и кварца (Q) в гнейсе селянkinского комплекса

Изображение BSE, Cameca SX 100 (то же на рис. 3, 4, 7)

Химический состав (в мас.%)
самородного золота из гнейсов

Номера анализов	Cu	As	Ag	Hg	Au	Сумма
1	0,20	0,08	—	—	100,19	100,48
2	0,17	0,13	—	0,06	99,45	99,81
3	0,09	0,11	0,05	0,03	100,34	100,63
4	0,16	0,05	—	—	99,29	99,49
5	0,13	0,33	—	0,01	99,95	100,43

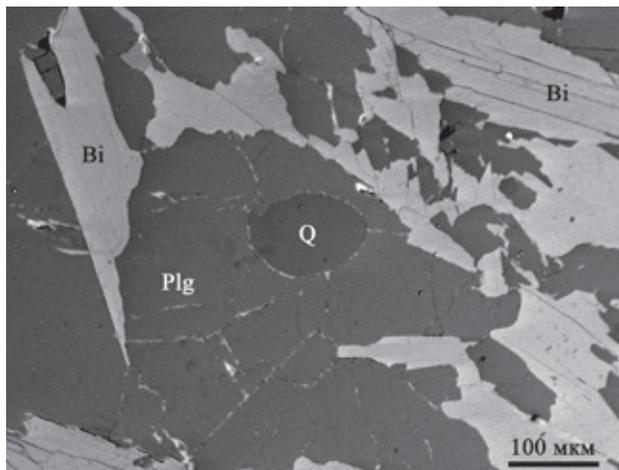


Рис. 3. Округлое (реликтовое окатанное?) зерно кварца в матрице плагиогнейса

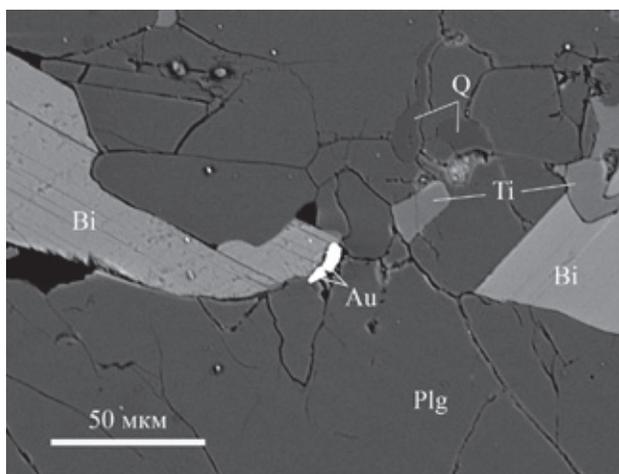


Рис. 4. Самородное золото (Au) в плагиогнейсе селянkinского комплекса в обрамлении зерен биотита (Bi), плагиоклаза (Plg), кварца (Q) и титаниита (Ti)

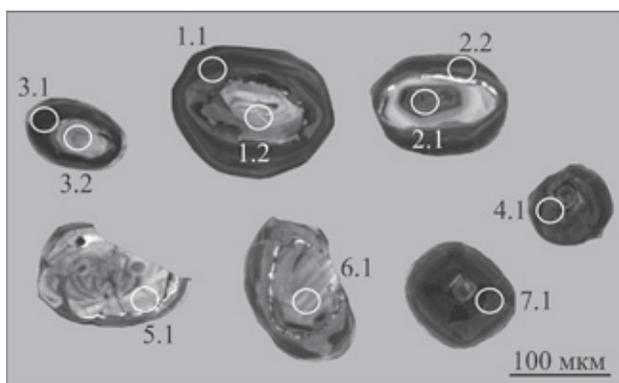


Рис. 5. Изображения цирконов из плагиогнейсов селянkinского комплекса в катодных лучах. Кружки — расположение локального U-Pb анализа с номерами анализов

Плагиоклаз, слагающий основную массу породы, однородный по составу (табл. 1) и относится к олигоклазу с содержанием анортитовой молекулы 15–16 %. Кварц в породе встречается реже, чем плагиоклаз, но иногда слагает отчетливо округлые и овальные зерна (рис. 3) размером до 1–2 мм, что позволяет предполагать осадочный субстрат для плагиогнейсов.

Кроме того, в плагиогнейсах нами обнаружена вкрапленность золота, установленного при изучении полированных шлифов метapelитов. Почти в каждом шлифе мы наблюдали от одного до нескольких зерен золота, что позволяет говорить о повышенном содержании его в изученных породах. Золото образует изогнутые индивиды удлиненной формы, по всей видимости, пластинки размерами от 5 до 30 мкм (рис. 4). Металл приурочен к межзерновому пространству. Химический состав самородного золота достаточно чистый и характеризуется высокой пробностью (табл. 2). Из примесей отмечаются медь до 0,2, мышьяк до 0,3, ртуть до 0,06 и серебро 0,05 мас. %). Последние два элемента определены на уровне чувствительности прибора. Подобные «чистые» золотины характерны для низкотемпературных метасоматитов, для кор выветривания и россыпей [19]. Мы предполагаем, что золотины сохранились как россыпной материал, т. е. имеют осадочный генезис.

Возраст гнейсов. U-Pb система. Циркон и монацит образуют акцессорную вкрапленность в гнейсах. Зерна циркона обычно короткопризматические до изометричных и не превышают 100–150 мкм по удлинению (рис. 5). В плагиогнейсах селянkinской толщи отмечаются [22] четыре морфологических типа цирконов: обломочные (округлые), изометричные (шаровидные), сростки кристаллов, короткопризматические. Хорошо ограненные кристаллы относятся к четвертому типу, остальные шарообразные. По данным микрозондового анализа, циркон отличается устойчивым составом с небольшой примесью гафния (HfO_2 до 1,7 мас. %).

Циркон — наиболее изученный акцессорный минерал в плагиогнейсах селянkinской толщи. Датирование разных типов цирконов показало, что округлые цирконы и их сростки охватывают от 1247 до 1943, а хорошо кристаллизованные призматические кристаллы от 236 до 77 млн лет [22]. Наши данные также показали древний возраст округлых (окатанных) цирконов из плагиогнейсов. Возраст окатанных цирконов (табл. 3, рис. 5–6) от 1996 ± 21 до 1815 ± 19 млн лет (SHRIMP II, ЦИИ ВСЕГЕИ). Первая группа анализов, видимо, отражает время кристаллизации циркона из магмы, а вторая из внешних частей зерен — возможный наложенный

U-Pb возраст цирконов из гнейсов селянкинского комплекса

Номера анализов	Содержание				Возраст $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, млн лет	Изотопные отношения, \pm %	
	$^{206}\text{Pb}_c$, %	$^{206}\text{Pb}^*$, г/т	U, г/т	Th, г/т		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$
1.1	0,03	132	463	17	1844 \pm 25	5,13 \pm 1,7	0,3312 \pm 1,5
1.2	0,24	37,7	118	31	2030 \pm 29	6,29 \pm 2,1	0,3701 \pm 1,7
2.1	0,00	80,9	256	108	2018 \pm 28	6,21 \pm 1,8	0,3675 \pm 1,6
2.2	0,11	93,6	344	18	1773 \pm 25	5,40 \pm 1,9	0,3165 \pm 1,6
3.1	0,00	178	732	14	1605 \pm 22	4,24 \pm 1,7	0,2826 \pm 1,5
3.2	0,27	30,4	112	54	1767 \pm 28	4,84 \pm 2,6	0,3154 \pm 1,8
4.1	0,00	80,2	439	27	1243 \pm 18	3,19 \pm 2,4	0,2126 \pm 1,6
5.1	0,12	47,3	212	21	1485 \pm 35	3,85 \pm 3,0	0,2591 \pm 2,7
6.1	0,22	22,3	77	51	1872 \pm 32	5,64 \pm 2,8	0,3369 \pm 2,0
7.1	0,00	75,2	602	26	875 \pm 13	2,11 \pm 2,0	0,1453 \pm 1,6

Примечание. Pb_c – обыкновенный свинец, Pb^* – радиогенный свинец; погрешности возраста и отношений приведены на уровне 1σ , погрешность калибровки относительно стандартов $0,29\%$; поправка на нерадиогенный свинец по ^{204}Pb .

метаморфизм (о чем свидетельствуют пониженные торий-урановые отношения).

Монацит образует акцессорную вкрапленность в гнейсах, его зерна обычно имеют хорошо ограниченный короткопризматический габитус и не превышают 100 мкм по удлинению (рис. 7). По данным микрозондового анализа (табл. 4; выбрано 7 точек из 25 анализов), минерал относится к цериевой разновидности монацита. Суммы анализов монацита близки к 100 %, что говорит о его хорошей сохранности.

Для изучения возраста плаггиогнейсов мы провели Th-U-Pb датирование акцессорного монацита (методом СИМЕ). Сейчас метод возрождается в связи с появлением современных микроанализаторов с программами расчета возраста [38]. При химическом датировании (по данным 25 анализов, по методу анализа в точке [37]) возраст монацитов из плаггиогнейсов селянкинской толщи от 251 до 312 млн лет. Построенные изохроны показали два достаточно сближенных, но отчетливо разных возраста (рис. 8). Данные по монациту определяют возраст метаморфизма плаггиогнейсов.

Sm-Nd система. Измерения изотопного состава неодима и концентраций Sm и Nd проводились на семиканальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты) в статическом двухленточном режиме с использованием рениевых и танталовых лент. Среднее значение отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте La Jolla $0,511835 \pm 18$ ($N = 15$). Ошибка в $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ отношениях $0,3\%$ (2σ) – среднее значение из 7 измерений в стандарте BCR-2. Погрешность измерения изотопного состава Nd в индивидуальном анализе $0,003\%$. Холостое внутрилабораторное загрязнение по Nd $0,3$ и по Sm $0,06$ нг. Точность определения концентраций Sm и Nd $\pm 0,5\%$. Изотопные отношения нормализованы по $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$, затем пересчитаны на принятое отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте La Jolla = $0,511860$. Параметры изохрон вычислялись с помощью программного комплекса ISOPLOT. При расчете $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ и модельных возрастов T_{DM} использованы современные значения CHUR по [34] $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512630$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1960$

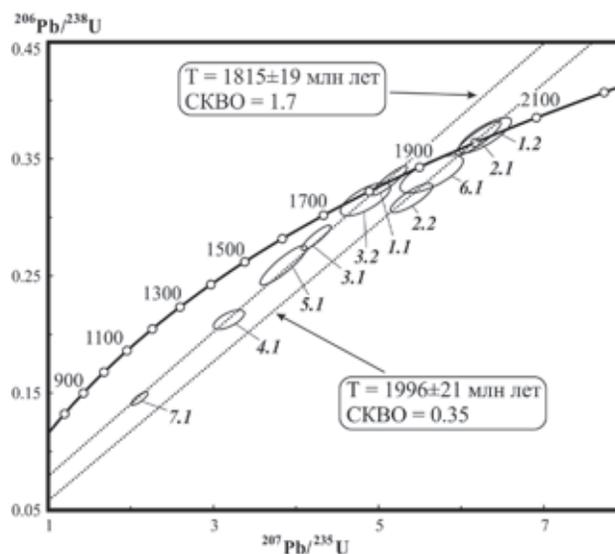


Рис. 6. График с конкордией для цирконов из плаггиогнейсов селянкинского комплекса. Погрешности пересечения дискордии с линией конкордии приведены на уровне 2σ . Номера анализов – см. табл. 3 и рис. 5

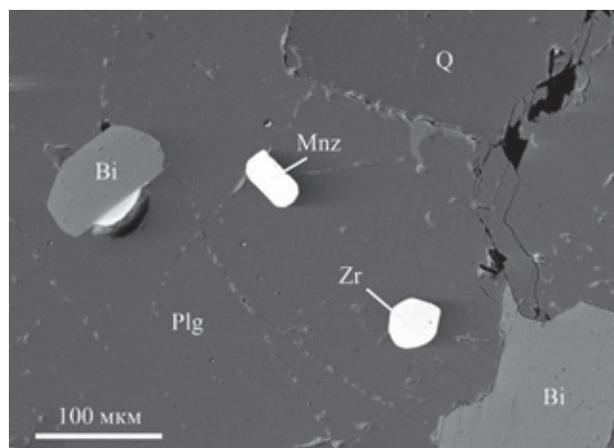


Рис. 7. Индивиды монацита (Mnz) и циркона (Zr) в агрегате плаггиоклаза (Plg), биотита (Bi) и кварца (Q) в гнейсе селянкинского комплекса

Химический состав (в мас.%)
акцессорного монацита из гнейсов

Окис- лы	Точки анализов						
	1	2	3	4	5	6	7
ThO ₂	1,99	3,03	2,17	2,34	2,29	2,84	2,35
UO ₂	0,19	0,21	0,22	0,19	0,17	0,20	0,22
SiO ₂	0,15	0,13	0,13	0,18	0,19	0,14	0,19
Ce ₂ O ₃	29,14	28,00	28,10	28,84	29,44	28,30	29,45
La ₂ O ₃	15,18	13,48	14,06	14,66	15,02	14,42	14,87
Nd ₂ O ₃	12,82	12,51	12,39	12,47	12,60	12,31	12,53
Pr ₂ O ₃	3,34	3,18	3,30	3,24	3,44	3,16	3,25
Sm ₂ O ₃	1,93	1,94	1,93	1,79	1,93	1,85	1,97
Gd ₂ O ₃	1,68	1,68	1,65	1,65	1,52	1,74	1,75
Dy ₂ O ₃	0,75	0,91	0,53	0,59	0,54	0,94	0,54
Tb ₂ O ₃	0,08	0,05	0,06	0,04	0,01	0,06	—
Eu ₂ O ₃	0,21	0,15	0,22	0,25	0,22	0,10	0,27
Er ₂ O ₃	0,04	0,11	—	0,04	—	0,10	—
Y ₂ O ₃	1,86	3,00	3,03	1,72	1,56	3,03	1,64
PbO	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04
CaO	0,77	0,69	0,50	0,54	0,50	0,68	0,55
P ₂ O ₅	30,41	30,64	30,55	30,33	30,37	30,77	30,22
Сум- ма	100,58	99,76	98,87	98,91	99,84	100,68	99,86

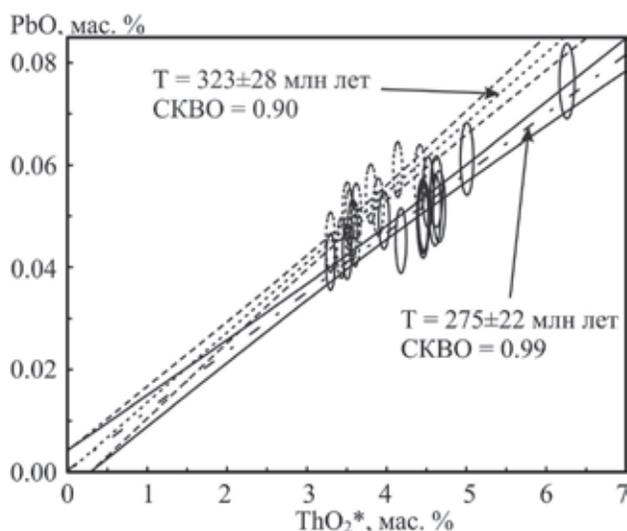


Рис. 8. Две линии регрессии (изохроны) в ThO₂*–PbO системе, построенные по микрондовым анализам монацита из плагиогнейсов селянжинского комплекса. Здесь ThO₂* = (ThO₂ + UO₂^э), где UO₂^э – содержание урана, пересчитанное в эквивалентное содержание тория, способное произвести то же количество Pb за время жизни системы при равенстве U–Pb и Th–Pb значений возраста. Эллипсы – величины погрешности 2σ, две симметричные гиперболы вокруг изохроны фиксируют погрешности

и DM по [36] ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0,513151, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0,2136 (табл. 5, рис. 9).

Первая изохрона без плагиоклаза, так как, по-видимому, Sm–Nd система плагиоклаза была изменена вследствие более поздних преобразований

Sm–Nd систематика гнейсов селянжинского комплекса

Проба	Содержание, г/т		Изотопные отношения	
	Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd
Вал *	3,78	21,01	0,1086	0,511519 ± 13
Плагиоклаз	5,18	29,85	0,1048	0,511559 ± 7
Гранат	5,94	24,45	0,1469	0,511635 ± 8
Слюда	7,13	30,07	0,1230	0,511555 ± 12

* Модельный возраст T_{DM} 2359, T_{CHUR} 1933 млн лет.

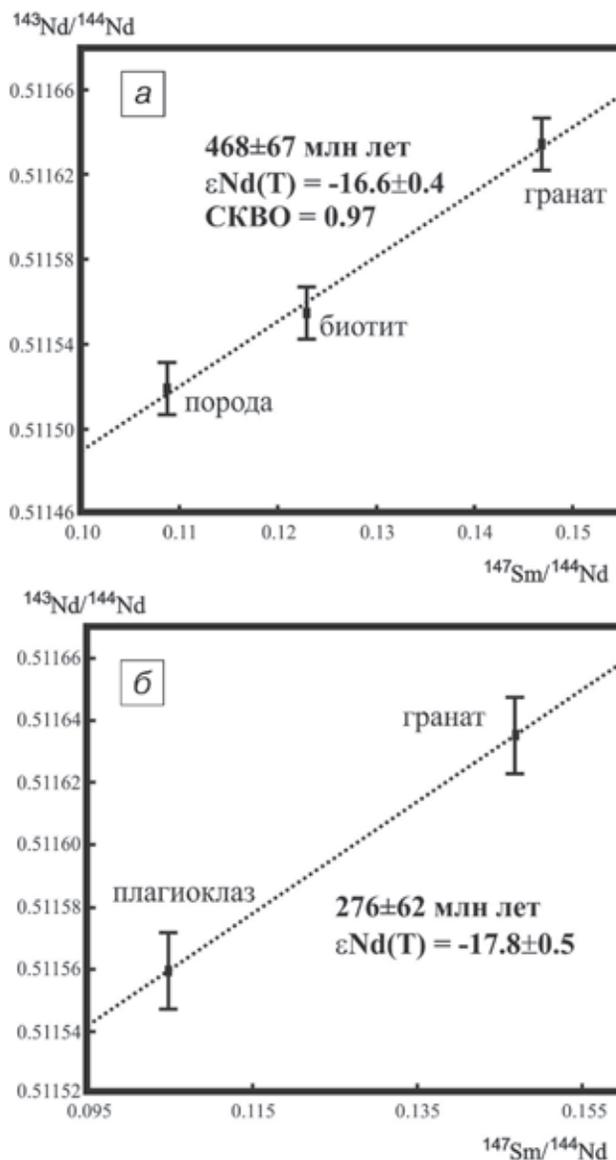


Рис. 9. Sm–Nd систематика для плагиогнейсов селянжинского комплекса

a – изохрона по породе и двум минералам, *б* – по двум минералам

и сместилась относительно изохроны. Двухточечная изохрона по плагиоклазу и гранату, по-видимому, отражает время последнего этапа метаморфизма. Судя по древнему модельному возрасту, изохрона по породе, слюде и гранату также отражает время

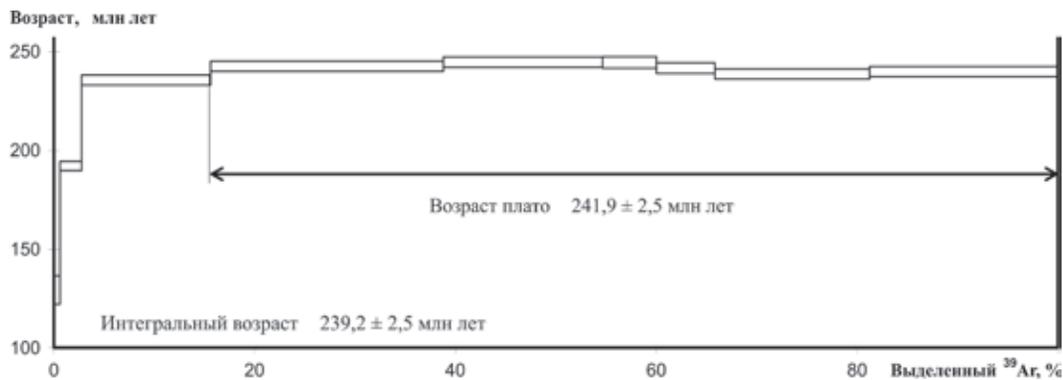


Рис. 10. Ar-Ar возраст биотита из плагиогнейсов селянкинского комплекса

метаморфизма древнего вещества (например, обломочного материала).

Rb-Sr система. Из тех же гнейсов по породе в целом, а также плагиоклазу, биотиту и гранату получена изохрона 214 ± 41 млн лет, фиксирующая какое-то наиболее позднее тектоно-термальное событие.

Ar-Ar система. Возраст (рис. 10) получен по монофракции биотита ($241,9 \pm 2,5$ млн лет).

Как видим, гнейсы селянкинской толщи сформировались как метаморфические породы не в докембрии, а в среднем-позднем палеозое, причем преобладают в них датировки 312–240 млн лет. На примере цирконов показано, что древний докембрийский материал в составе этих пород отмечается лишь в виде окатанных зерен (вероятно, это продукты размыва и сноса с Русской платформы). Метаморфиты Ильменогорской зоны находятся непосредственно к востоку от зоны Главного Уральского глубинного разлома (в его висячем крыле), являвшегося зоной субдукции в среднем палеозое [4], поэтому можно уверенно предполагать, что данные метаморфические комплексы представляют собой глубинные части островодужной системы, позднее выведенные на уровень верхней коры. Именно ограниченное (не более 6–10 %) постколлизийное субширотное растяжение сформировало главные черты наблюдаемой сейчас структуры Урала [4]. Она характеризуется чередованием субмеридиональных зон: синформных, выполненных неметаморфизованными вулканогенными и осадочными толщами, и антиформных, сложенных глубинными метаморфическими и интрузивными комплексами. Выведение на близповерхностный уровень мегаблоков, сложенных глубинными метаморфическими и плутоническими комплексами, происходило в результате их подъема на уровень верхней коры при ее разрыве и растяжении. Пик этого растяжения приходится примерно на границу раннего триаса и поздней перми (≈ 250 млн лет); именно в это время начали формироваться системы угленосных грабен на Урале и рифтов в Западной Сибири. Этот возрастной рубеж (≈ 250 млн лет) практически повсеместно проявлен и устанавливается в метаморфических и интрузивных комплексах Урала как время одного из последних тектоно-термальных событий.

Таким образом, «протерозойские» метаморфические толщи восточного склона Урала в основном являются фактически палеозойскими шовными тектоническими зонами и глубинными комплексами,

генерировавшимися в ходе палеозойской тектоно-метаморфической эволюции Уральской складчатой системы более или менее одновременно с зеленокаменными вулканогенно-осадочными толщами, но на больших глубинах при разных РТ параметрах.

1. Водорезов Г.И., Абдулин А.А., Гетлинг Р.В. и др. Докембрий и нижний палеозой, точнее не определенный. Мугоджары // Геология СССР. Т. XXI. Кн. 1. — М.: Наука, 1970. — С. 61–69.

2. Гаррис М.А. Этапы магматизма и метаморфизма в доюрской истории Урала и Приуралья. — М.: Наука, 1977. — 296 с.

3. Геологические типы метаморфизма в региональных структурах Урала: Объясн. зап. к карте типов и фаций метаморфизма Урала м-ба 1 : 1 000 000 / ред. Г.А. Кейльман и К.К. Золоев. — Екатеринбург, 1991. — 90 с.

4. Иванов К.С. Основные черты геологической истории (1,6–0,2 млрд лет) и строения Урала. — Екатеринбург: УрО РАН, 1998. — 252 с.

5. Иванов К.С., Иванов С.Н. Основные проблемы рифея Урала // Рифей Северной Евразии. Геология. Общие проблемы стратиграфии: Материалы Всерос. совещ. — Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1997. — С. 111–127.

6. Иванов К.С., Пучков В.Н., Бабенко В.А. Находки конодонтов и граптолитов среди метаморфизованных толщ на Южном Урале // ДАН СССР. 1990. Т. 310. № 3. — С. 676–679.

7. Иванов С.Н. О байкалидах Урала и Сибири // Геотектоника. 1981. № 5. — С. 47–65.

8. Иванов С.Н., Краснобаев А.А., Русин А.И. Докембрий Урала // Докембрий в фанерозойских складчатых поясах. — Л.: Наука, 1982. — С. 81–94.

9. Кейльман Г.А. Мигматитовые комплексы подвижных поясов. — М.: Недра, 1974. — 200 с.

10. Кориневский В.Г., Кориневский Е.В. Блоки чужеродных пород в ильменогорском метаморфическом комплексе // Магматизм, метаморфизм и глубинное строение Урала. — Екатеринбург, 1997. — С. 189–192.

11. Краснобаев А.А. Проблемы геохронологии докембрия на Урале // Ежегодник-1984. Инф. материалы. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. — С. 26–30.

12. Краснобаев А.А. Циркон как индикатор геологических процессов. — М.: Наука, 1986. — 148 с.

13. Краснобаев А.А., Давыдов В.А., Шулькин Е.П., Чердниченко Н.В. Цирконология Селянкинского блока Ильменских гор // Доклады РАН. 2001. Т. 379. № 6. — С. 807–811.

14. Краснобаев А.А., Ленных В.И., Холоднов В.В., Жданова С.Н. О реликтах гранулитового метаморфизма в породах ильменогорского комплекса (Южный Урал) // ДАН СССР. 1980. Т. 253. № 5. — С. 1193–1196.

15. Краснобаев А.А., Русин А.И. Схематический геолого-радиологический разрез докембрия Урала // Ежегодник ИГГ УНЦ АН СССР. — Свердловск, 1979. — С. 7–9.

16. *Медведева Е.В.* Зональность граната из метаморфических пород Ильменских гор (Южный Урал) // *Литосфера*. 2007. № 5. — С. 171–180.
17. *Медведева Е.В., Вализер П.М.* Новые данные по минералогии метапелитов и амфиболитов Селянкинского блока (ильмено-вишневогорский комплекс, Южный Урал) // *Уральский минералогический сборник*. — Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2001. № 11. — С. 65–79.
18. *Медведева Е.В., Никандров С.Н.* Слюда из метаморфических толщ Ильменских гор // *Материалы II Междунар. конф. «Кристаллогенезис и минералогия»*. — СПб., 2007. — С. 299–304.
19. *Минералогия Урала: Элементы. Карбиды. Сульфиды*. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 390 с.
20. *Минкин Л.М.* Карта метаморфизма Северного, Среднего и северо-восточной части Южного Урала: Объясн. зап. — Свердловск, 1975. — 276 с.
21. *Попов В.А., Попова В.И.* Минералогия пегматитов Ильменских гор. Минералогический альманах. — М.: Ассоциация Эконост, 2006. — Т. 9. — 152 с.
22. *Пыстина Ю.И., Пыстин А.М.* Цирконовая летопись уральского докембрия. — Екатеринбург: УРО РАН, 2002. — 168 с.
23. *Рассказова А.Д.* Геологическое строение Ильменских–Вишневых гор // *Уфимская широтная структура Урала*. — Миасс, 1992. — С. 18–32.
24. *Русин А.И.* Дорифейские метаморфические комплексы восточного склона Урала // *Доордовикская история Урала*. Т. 3. — Свердловск, 1980. — С. 41–59.
25. *Русин А.И., Краснобаев А.А., Вализер П.М.* Геология Ильменских гор: ситуация, проблемы // *Миасс: ИГЗ УрО РАН*, 2006. С. 3–19.
26. *Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой)*. — Екатеринбург: Роскомнедра, ИГГ УрО РАН, 1993.
27. *Сурин Т.Н.* Челябинский континентальный рифт — геодинамическое заблуждение // *Уральский геологический журнал*. 2001. № 5 (23). — С. 3–40.
28. *Сурин Т.Н., Мосейчук В.М.* Восточно-Уральский (Мугоджарский) «микроконтинент» на Южном Урале и его природа // *Ежегодник-1997*. — Уфа: ИГ УНЦ РАН, 1999. — С. 133–136.
29. *Тектоника Урала (Объясн. зап. к Тектонической карте Урала м-ба 1 : 1 000 000) / А.В. Пейве, С.Н. Иванов, В.М. Нечехун и др.* — М.: Наука, 1977. — 120 с.
30. *Турбанов В.Ф., Панков Ю.Д., Милицина В.С.* Стратиграфия южного периклинального замыкания Вишневогорско-Ильменогорского антиклинория // *Ильменский комплекс магматических и метаморфических пород*. — Свердловск: УНЦ, 1971. — С. 23–32.
31. *Формирование земной коры Урала / С.Н. Иванов, В.Н. Пучков, К.С. Иванов и др.* — М.: Наука, 1986. — 248 с.
32. *Шалаинов В.В.* Раннедокембрийские комплексы Уральского складчатого пояса и их минералогия // *Геология и минерагенция подвижных поясов*. — Екатеринбург, 1997. — С. 159–173.
33. *Bhattacharya A., Mohanty L., Maji A., Sen S., Raith M.* Non-ideal mixing in the phlogopite-annite binary: constraints from experimental data on the Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer // *Contrib. to Mineralogy and Petrology*. 1992. Vol. 111. — P. 87–93.
34. *Bouvier A., Vervoort J.D., Patchett P.J.* The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets // *Earth Planet Sci. Lett.* 2008. Vol. 273. — P. 48–57.
35. *Echtler H.P., Ivanov K.S., Ronkin Y.L., Karsten L.A., Hetzel R., Noskov A.G.* The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals (Russia): a reappraisal // *Tectonophysics*. 1997. Vol. 276. — P. 229–251.
36. *Goldstein S.J., Jacobsen S.B.* Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material implications for crystal evolution // *Earth Planet Sci. Lett.* 1988. Vol. 87. — P. 249–265.
37. *Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A.* Electron microprobe dating of monazite // *Chem. Geology*. 1996. Vol. 131. — P. 37–53.
38. *Suzuki K., Adachi M.* Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrain, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime // *Geochem. J.* 1991. Vol. 25. — P. 357–376.

1. *Vodoretzov G.I., Abdulin A.A., Getling R.V. et al.* Precambrian and Lower Paleozoic not defined more precisely. *Mugojar. Geology of the USSR*. Vol. XXI. Bk. 1. Moscow: Nauka. 1970. Pp. 61–69. (In Russian).

2. *Garris M.A.* *Etapy magmatizma i metamorfizma v doyrurskoy istorii Urala i Priuralya* [Stages of magmatism and metamorphism in the pre-Jurassic history of the Urals and fore-Urals]. Moscow: Nauka. 1977. 296 p.

3. *Geologicheskie tipy metamorfizma v regionalnykh strukturakh Urala: Obyasnitelnaya zapiska k karte tipov i fatsiy metamorfizma Urala masshtaba 1 : 1 000 000* [Geological types of metamorphism in regional structures of the Urals: Explanatory Note to the Map of metamorphism types and facies in the Urals at 1 : 1,000,000 scale]. Ed. G.A. Keylman and K.K. Zoloev. Ekaterinburg: 1991. 90 p.

4. *Ivanov K.S.* *Osnovnye cherty geologicheskoy istorii (1.6–0.2 mlrd let) i stroeniya Urala* [Main features of geological history (1.6–0.2 billion years) and structure of the Urals]. Ekaterinburg: IGG UrB RAS. 1998. 252 p.

5. *Ivanov K.S., Ivanov S.N.* Main issues of the Riphean in the Urals. *Riphean in Northern Eurasia. Geology. Common problems of stratigraphy: Proc. All-Rus. Conference*. Ekaterinburg: IGG UrB RAS. 1997. Pp. 111–127. (In Russian).

6. *Ivanov K.S., Puchkov V.N., Babenko V.A.* Finds of conodonts and graptolites among metamorphic strata in the Southern Urals. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1990. Vol. 310. No 3, pp. 676–679. (In Russian).

7. *Ivanov S.N.* Towards the Baikalsides in the Urals and Siberia. *Geotektonika*. 1981. No 5, pp. 47–65. (In Russian).

8. *Ivanov S.N., Krasnobaev A.A., Rusin A.I.* Precambrian in the Urals. *Precambrian in the Phanerozoic foldbelts*. Leningrad: Nauka. 1982. Pp. 81–94. (In Russian).

9. *Keylman G.A.* Migmatitovye kompleksy podviznykh pojasov [Migmatite complexes in mobile belts]. Moscow: Nedra. 1974. 200 p.

10. *Korinevskii V.G., Korinevskii E.V.* Blocks of allogenic rocks in the Ilmen metamorphic complex. *Magmatism, metamorphism, and deep structure of the Urals*. Ekaterinburg. 1997. Pp. 189–192. (In Russian).

11. *Krasnobaev A.A.* Issues of the Precambrian geochronology in the Urals. *Yearbook-1984. Inf. materials*. Sverdlovsk: Ufa Scientific Center, USSR AS. 1985. Pp. 26–30. (In Russian).

12. *Krasnobaev A.A.* Tsirkon kak indikator geologicheskikh protsessov [Zircon as an indicator of geological processes]. Moscow: Nauka. 1986. 148 p.

13. *Krasnobaev A.A., Davydov V.A., Shchulkin E.P., Cherednichenko N.V.* Zirconology of the Selyankino block of the Ilmen Mountains. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2001. Vol. 379. No 6, pp. 807–811. (In Russian).

14. *Krasnobaev A.A., Lennykh V.I., Kholodnov V.V., Zhdanova S.N.* Towards granulite metamorphism relics in rocks of the Ilmen complex (Southern Urals). *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1980. Vol. 253. No 5, pp. 1193–1196. (In Russian).

15. *Krasnobaev A.A., Rusin A.I.* Schematic geological and radiological section of the Precambrian in the Urals. *Yearbook IGG USC USSR AS*. Sverdlovsk. 1979. Pp. 7–9. (In Russian).

16. *Medvedeva E.V.* Zoning of garnet from metamorphic rocks of the Ilmen Mountains (Southern Urals). *Litosfera*. 2007. No 5, pp. 171–180. (In Russian).

17. *Medvedeva E.V., Valizer P.M.* New data on mineralogy of metapelite and amphibolite in the Selyankinsky block (Ilmen-Vishnevogorsk complex, Southern Urals). *Ural mineralogical collection*. Miass: IGE, UrB RAS. 2001. No 11, pp. 65–79. (In Russian).

18. *Medvedeva E.V., Nikandrov S.N.* Mica from metamorphic beds of the Ilmen Mountains. *Proceedings of the II Intern. Conf. "Crystallogenesis and Mineralogy"*. St. Petersburg. 2007. Pp. 299–304. (In Russian).

19. Mineralogiya Urala: Elementy. Karbidy. Sulfidy [Mineralogy of the Urals: Elements. Carbides. Sulphides]. Sverdlovsk, UrB USSR AS. 1990. 390 p.
20. Minkin L.M. Karta metamorfizma Severnogo, Srednego i severo-vostochnoy chasti Yuzhnogo Urala: Obyasnitelnaya zapiska [Map of metamorphism in the northern, middle, and north-eastern part of the Southern Urals: Explanatory Note]. Sverdlovsk. 1975. 276 p.
21. Popov V.A., Popova V.I. Mineralogiya pegmatitov Il'menskikh gor. Mineralogicheskiy almanakh [Mineralogy of the Ilmen Mountains pegmatites. Mineralogical Almanac]. Moscow: ECOST Association. 2006. Vol. 9. 152 p.
22. Pystina Yu.I., Pystin A.M. Tsirkonovaya letopis ural'skogo dokembriya [Zircon record of the Precambrian in the Urals]. Ekaterinburg: UrB RAS. 2002. 168 p.
23. Rasskazova A.D. Geological structure of the Ilmen – Vishneve mountains. *Ufa latitudinal structure of the Urals*. Miass. 1992. Pp. 18–32. (In Russian).
24. Rusin A.I. Pre-Riphean metamorphic complexes in the eastern slope of the Urals. *Pre-Ordovician history of the Urals*. Vol. 3. Sverdlovsk. 1980. Pp. 41–59. (In Russian).
25. Rusin A.I., Krasnobaev A.A., Valizer P.M. Geology of the Ilmen Mountains: Situation, Problems. *Proceedings IGZ UrO RAN*. Miass: 2006. Pp. 3–19. (In Russian).
26. Stratigraficheskie skhemy Urala (dokembriy, paleozoy) [Stratigraphic charts of the Urals (Precambrian, Paleozoic)]. Ekaterinburg: Roskomnedra. IGG UrB RAS. 1993.
27. Surin T.N. Chelyabinsk continental rift, a geodynamic misapprehension. *Uralskiy geologicheskiy zhurnal*. 2001. No 5 (23), pp. 3–40. (In Russian).
28. Surin T.N., Moseychuk V.M. East Ural (Mugojar) "microcontinent" in the Southern Urals and its nature. *Yearbook-1997*. Ufa: IG USC RAS. 1999. Pp. 133–136. (In Russian).
29. Tektonika Urala (obyasnitelnaya zapiska k Tektonicheskoy karte Urala masshtaba 1 : 1 000 000) [Tectonics of the Urals (Explanatory Note to the Tectonic map of the Western Urals at 1 : 1,000,000 scale)]. Ed by A.V. Peive, S.N. Ivanov, V.M. Necheukhin et al. Moscow: Nauka. 1977. 120 p.
30. Turbanov V.F., Pankov Yu.D., Militsina V.S. Stratigraphy of the southern periclinal closing of the Vishnevogorsk-Ilmen anticlinorium. *Ilmen complex of igneous and metamorphic rocks*. Sverdlovsk: USC. 1971. Pp. 23–32. (In Russian).
31. Formirovaniye zemnoy kory Urala [Crust formation in the Urals]. Ed by S.N. Ivanov, V.N. Puchkov, K.S. Ivanov i dr. Moscow: Nauka. 1986. 248 p.
32. Early Precambrian complexes of the Ural foldbelt and their minerageny. *Geology and Minerageny of Mobile Belts*. Ekaterinburg. 1997. Pp. 159–173. (In Russian).
33. Bhattacharya, A., Mohanty, L., Maji, A., Sen, S., Raith, M. 1992: Non-ideal mixing in the phlogopite-annite binary: constraints from experimental data on the Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer. *Contrib. to Mineralogy and Petrology*, vol. 111. 87–93.
34. Bouvier, A., Vervoort, J.D., Patchett, P.J. 2008: The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth Planet Sci. Lett.*, vol. 273. 48–57.
35. Ehtler, H.P., Ivanov, K.S., Ronkin, Y.L., Karsten, L.A., Hetzel, R., Noskov, A.G. 1997: The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals (Russia): a reappraisal. *Tectonophysics*, vol. 276. 229–251.
36. Goldstein, S.J., Jacobsen, S.B. 1988: Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material implications for crystal evolution. *Earth Planet Sci. Lett.*, vol. 87. 249–265.
37. Montel, J.-M., Fore, S., Veschambre, M., Nicollet, C., Provost, A. 1996: Electron microprobe dating of monazite. *Chem. Geology*, vol. 131. 37–53.
38. Suzuki, K., Adachi, M. 1991: Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrain, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. *Geochem. J.*, vol. 25. 357–376.

Иванов Кирилл Святославич – доктор геол.-минер. наук, зав. лаб., ИГГ УрО РАН¹. <ivanovks@igg.uran.ru>
Ерохин Юрий Викторович – канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ИГГ УрО РАН¹. <erokhin-yu@yandex.ru>
Хиллер Вера Витальевна – канд. геол.-минер. наук, ст. науч. сотрудник, ИГГ УрО РАН¹. <hilvervit@mail.ru>
Родионов Николай Викторович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия. <Nickolay_Rodionov@vsegei.ru>
Серов Павел Александрович – канд. геол.-минер. наук, науч. сотрудник, Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (ИГ КНЦ РАН). Ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209, Россия. <serov@geoksc.apatity.ru>

Ivanov Kirill Svyatoslavich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the laboratory, IGG UB RAS¹. <ivanovks@igg.uran.ru>
Erokhin Yuriy Viktorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, IGG UB RAS¹. <erokhin-yu@yandex.ru>
Khiller Vera Vital'evna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, IGG UB RAS¹. <hilvervit@mail.ru>
Rodionov Nikolay Viktorovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia. <Nickolay_Rodionov@vsegei.ru>
Serov Pavel Aleksandrovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher, Geological Institute of Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences (GI KSC RAS). 14 ul. Fersmana, Apatity, Murmanskaya obl., 184209, Russia. <serov@geoksc.apatity.ru>

¹ Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН). Ул. Академика Вонсовского, 15, Екатеринбург, 620016, Россия.
 The Federal State Institution of Science the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IGG UB RAS). 15 ul. Akademika Vonsovskogo, Ekaterinburg, 620016, Russia.