

УДК 552.48+550.93

ИЗОТОПНОЕ U–Pb SHRIMP-ДАТИРОВАНИЕ ЭКЛОГИТОВ МУГОДЖАР (КАЗАХСТАН)

© 2025 г. К. С. Иванов¹, В. С. Пономарев^{1,*},
член-корреспондент РАН В. Н. Пучков¹, Д. А. Ханин²

Поступило 19.08.2024 г.

После доработки 10.09.2024 г.

Принято к публикации 16.09.2024 г.

На крайнем юге Урала, в метаморфитах Восточно-Мугоджарской зоны датированы цирконы из эклогитов и амфиболита. Из 4-х проб эклогитов, близкие (и наиболее “древние” — 520 ± 4 млн лет) значения конкордантного возраста получены в 3-х пробах, что, вероятно, соответствует возрасту протолита. Конкордантные датировки 472 ± 3 млн лет и 379 ± 3 млн лет отражают время основных этапов метаморфизма Восточных Мугоджар, более древняя — высокобарического, а вторая — метаморфизма амфиболитовой фации. Присутствие древних, и при этом разновозрастных цирконов, вероятно со следами окатывания, свидетельствует о первично-осадочной природе исследованных амфиболитов. Наиболее молодые цирконы из эклогитов Мугоджар имеют возраст 282 ± 2 млн лет, отвечающий этапу коллизии. Полученные данные показывают, что метаморфические комплексы Мугоджар не являются раннепротерозойскими, или рифейскими образованиями (как это полагали ранее), но представляют собой ниже-среднепалеозойские комплексы средней части земной коры. Т.е. эти метаморфиты по своей природе являются фрагментами глубинной части островодужной системы восточного сектора Урала, которые позднее были выведенные на близ-поверхностный уровень при подъёме и эрозии отдельных районов Урала.

Ключевые слова: эклогит, амфиболит, циркон, U–Pb-возраст, Мугоджары, Урал, Казахстан

DOI: 10.31857/S2686739725010034 EDN: GXIFEQ

Эклогиты Восточных Мугоджар находятся в самой южной части Уральского складчатого пояса, на территории Казахстана. Здесь, в западной части Восточно-Мугоджарской зоны расположен (рис. 1) Талдыкский сиалический блок, контактирующий по разломам на западе с основными вулканитами Западно-Мугоджарской зоны Магнитогорской мегазоны, а на востоке — с Балкымбайским при-сдвиговым грабеном. Талдыкский блок

сложен метаморфическими породами преимущественно амфиболитовой фации, которые вмещают массивы гранитов, гранодиоритов и др. Среди метаморфитов обычно выделяются талдыкская и южномугоджарская серии, подразделяющиеся на ряд толщ [2, 10, 13], в состав которых входят преимущественно слюдяные гнейсы, кристаллические сланцы с кианитом и гранатом, прослой кварцитов, амфиболиты, амфиболовые гнейсы, зачастую мигматизированные и др. Метаморфизм этих толщ на прогрессивном этапе отвечал высокотемпературной ($T = 680–720$ °C; $P = 7–8.5$ кбар), а на регрессивном — низкотемпературной ($T = 580–630$ °C; $P = 5.5–6.5$ кбар) зонам амфиболитовой фации [4, 14]. Возраст метаморфических толщ Талдыкского блока являлся предметом длительной дискуссии. Обычно их считали раннепротерозойскими ([13] и др.),

¹ Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого
Уральского отделения Российской Академии наук,
Екатеринбург, Россия

² Институт экспериментальной минералогии им. академика
Д.С. Коржинского Российской Академии наук, Черноголовка,
Россия

* E-mail: p123v@yandex.ru

высказывались также мнения об их рифейском [2, 4] или ранне-среднепалеозойском возрасте [5]. Однако современных геохронологических исследований здесь практически не было, а данные [8, 9], к сожалению, не были увязаны с геологией региона. В пределах Талдыкского блока описаны [1, 13, 15] и высокобарические породы, такие как двуслюдяные кианит-гранатовые сланцы (среди которых есть и месторождения кианита), эклогиты и эклогитоподобные породы. Эклогиты Мугоджар обычно разделяют на два комплекса — Тулепсайский и Китарсайский [4, 13, 14, 16]. Китарсайский комплекс (эклогит-перидотитовая офиолитовая ассоциация) состоит из многочисленных мелких тел, приуроченных к линейной зоне северо-восточного простираия (Бугетысайский разлом), прослеживаемой на 25 км. Эта зона имеет мощность до 1 км и сложена главным образом кварц-полевошпатовыми бластомилонитами ставролитовой фации. Тела (будины, линзы) Китарсайской эклогит-перидотитовой ассоциации расположены на левобережье р. Улы-Талдык (см. рис. 1), они имеют размеры от нескольких метров до первых сотен метров. Обычно они сложены серпентинитами, в которых присутствуют включения гранатовых серпентинитов, вебстеритов, эклогитов, эклогитоподобных пород, гранатитов и гранатовых амфиболитов. Рассчитанные для метабазитовых парагенезисов температуры составляют 600–850 °С и выше, а давления оцениваются как 7–14 кбар [13]. Эклогитовые и эклогит-симплектитовые тела Тулепсайского комплекса расположены (см. рис. 1) среди амфиболитов на правом берегу р. Тулепсай [4, 13]. Недавно А.В. Рязанцевым с коллегами получен U–Pb-возраст (SHRIMP II) по цирконам 374–372 млн лет и U–Pb-возраст по рутилу 360 млн лет из эклогитов Тулепсайского комплекса. Датировка 374 млн лет оценивается [15] как возраст метаморфизма эклогитовой фации (с максимальными параметрами $P = 15$ кбар, $T = 700–750$ °С). Датировку 360 млн лет эти авторы связывают с более поздним преобразованием эклогитов при падающем давлении.

Для проведения изотопно-геохронологических исследований были отобраны 4 пробы эклогитов и 1 — амфиболитов (см. рис. 1), весом более 30 кг каждая. Пробы были взяты в центральных, наименее изменённых частях будинообразных тел эклогитов, вскрытых канавами, вырытыми Приуральской партией ПГО “Запказгеология” (начальник партии

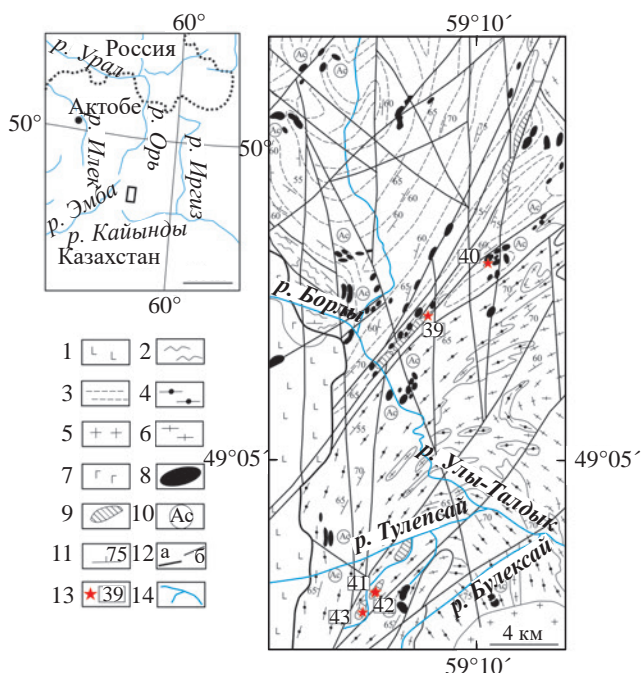


Рис. 1. Схема размещения высокобарических и гипербазитовых комплексов в центральной части Талдыкского сиалического блока Мугоджар (по данным [1, 13, 16], с изменениями авторов). 1 — базальты (D_2); 2–4 — метаморфиты: кварцево-филлитовой серии; 3 — гнейсо-сланцевой серии; 4 — гнейсо-амфиболитовой серии; 5 — граниты (C_2-P_1); 6 — плагиогнейсо-граниты (D); 7 — габбро, габбро-нориты (D_2); 8 — гипербазиты; 9 — эклогиты и эклогитоподобные породы; 10 — места обнаружения тел асбестизированных гипербазитов; 11 — элементы залегания сланцеватости; 12 — разломы: главные (а), второстепенные (б); 13 — места отбора проб для датирования и их номера; 14 — реки и ручьи

Б.Ф. Иваньшин). Выделение циркона проводилось по стандартной методике, включающей дробление пробы до фракции <0.4 мм, промывку издробленного материала в воде до серого шлиха, магнитную сепарацию, разделение в тяжёлых жидкостях и ручной отбор зёрен циркона под биноклем. Размер выделенных цирконов от 100 до 350 мкм. U–Th–Pb-геохронологические исследования цирконов из эклогитов были выполнены А.Н. Ларионовым на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-II в ЦИИ ВСЕГЕИ по методике, описанной в [20]. Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных ионов кислорода составляла $\sim 2.5–4$ нА, диаметр пятна (кратера) — $\sim 15 \times 10$ мкм. Индивидуальные погрешности даны для интервала 1σ (%),

рассчитанные возрасты – 2σ (млн лет). Полученные данные обрабатывались с помощью программ SQUID и ISOPLOT [19].

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ЭКЛОГИТОВ

Исследуемые эклогиты представлены мелкозернистым до тонкозернистым агрегатом глаукофана, омфацита и порфиробластами альмандина (рис. 2 А, Б, проба 41). В породах отмечаются прожилки, выполненные омфацитом, эпидотом, цоизитом, клиноцоизитом, глаукофаном второй генерации и альбитом. Структура пород от мелкозернистой до тонкозернистой, порфиробластовая, гранонематобластовая, текстура – массивная. Главными породообразующими минералами являются омфацит, альмандин и глаукофан. Второстепенные минералы: актинолит, цоизит, клиноцоизит, кальцит, парагонит, ферропаргасит, ферроэдентит, клинохлор, шамозит, мусковит (фенгит), кварц, рутил, титанит, фторапатит, ильменит, альбит, пирит, циркон и алланит-(Ce). Химический состав минералов и их кристаллохимические пересчёты приведены в приложении 1 (табл. 1S; дополнительные материалы размещены в электронном виде по DOI статьи и на сайте редакции).

Гранат в эклогитах образует метакристаллы (до 1 см) с включениями омфацита, актинолита, ферропаргасита, ферроэдентита, глаукофана, ильменита, титанита, рутила и фторапатита. По химическому составу гранат отвечает альмандину $\text{Alm}_{59.8-72.9}\text{Prp}_{9.28-17.8}\text{Grs}_{12.3-26.7}\text{Sps}_{0.4-2.0}\text{And}_{0-1.5}$. В альмандине наблюдается

небольшое увеличение содержания MgO и уменьшение CaO от центра к периферии кристаллов. *Глаукофан* (до 50% от объёма породы) – основной минерал эклогитов. В глаукофановом агрегате встречаются реликтовые зёрна омфацита частично замещённые клиноцоизитом, титанитом и парагонитом. Магнезиальность глаукофана ($\text{Mg}^\#$) 0.64–0.73. *Омфацит* (20–30% от объёма породы) представлен тонкозернистым агрегатом вокруг порфиробластов альмандина. Содержание жадеитового минала в омфаците от 39 до 47%. В омфацит-глаукофановом агрегате встречаются симплектиты, матрица которых, представлена альбитом (Ab_{99}) с включениями актинолита. Вокруг крупных порфиробластов альмандина в породах отмечается тонкозернистый альбит-клинохлор-шамозитовый агрегат с фенгитом. Цоизит в породах образует мелкие вытянутые индивиды глаукофана. Часть зёрен цоизита в глаукофан-омфацитовом агрегате замещена по периферии клиноцоизитом. Также в породах отмечаются индивиды клиноцоизита, на которые по краям нарастает эпидот. В глаукофане встречаются включения алланита-(Ce). *Титанит* в породе встречается в виде включений совместно с рутилом в альмандине, омфаците, глаукофане и в агрегате минералов группы эпидота. *Рутил* в породах встречается повсеместно в виде отдельных зёрен вытянутой или неправильной формы, так и с оторочкой из титанита. В породах встречается рутил, обогащённый железом (FeO до 12.51 мас. %). *Парагонит* образует небольшие скопления зёрен, частично замещая омфацит. В эклогитах в виде единичных зёрен

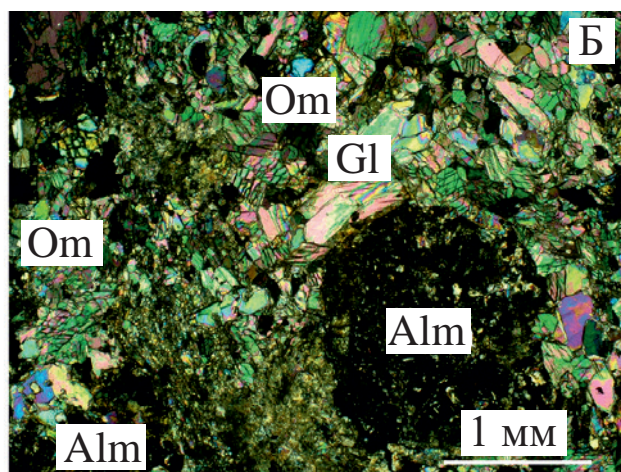
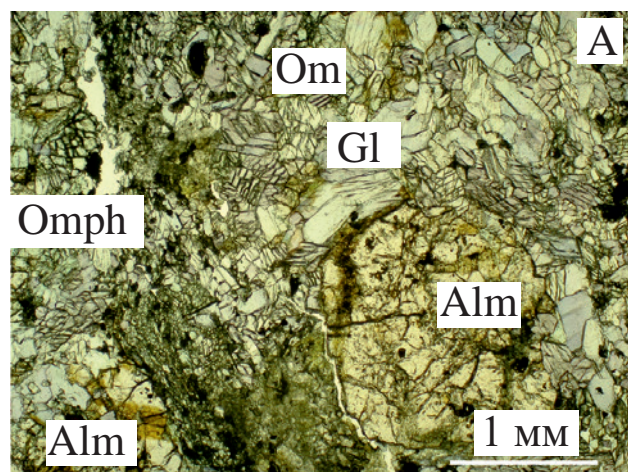


Рис. 2. Эклогит Тулепсайского комплекса Восточных Мугоджар (проба 41). В проходящем свете (А), в поляризованном свете (Б). Alm – альмандин, Om – омфацит, Gl – глаукофан

в альмандин-амфиболовом агрегате отмечается кобальтсодержащий *пирит* (Со до 2.46 мас. %). *Ильменит* с высоким содержанием марганца (MnO до 4.71 мас. %) встречается в виде включения альмандине в эклогите совместно с рутилом и титанитом. *Альбит* в породах образует вытянутые зёрна в шамозит-клинохлоровом агрегате совместно с фенгитом мусковитом и кальцитом, а также прожилки и скопления с крупными зёрнами глаукофана. *Кварц* в эклогитах, в небольшом количестве присутствует в виде включений в гранате и зёрнах кальцита. *Фторанатит* отмечается в виде включений в альмандине, омфациите и кальците совместно с кварцем. *Циркон* встречается в виде идиоморфных вытянутых зёрен размером до 350 мкм в породообразующих минералах.

U–Pb SHRIMP-ДАТИРОВАНИЕ ЦИРКОНОВ ЭКЛОГИТОВ

Проба 39 (Китарсайский комплекс). Эклогиты (амфиболитизированные, иногда с плагиоклазом) в серпентинитах. Мощность эклогитовых тел не превышает 5 м. Форма их вытянутая, будинообразная, длиной до 100 м. Цирконы имеют розовую окраску, призматический и удлиненно-призматический габитус (рис. 3). Грани кристаллов блестящие, рёбра некоторых кристаллов немного скруглённые. Внутреннее строение кристаллов ритмично-зональное. В некоторых кристаллах выделяется внутреннее ядро. Практически все полученные датировки (табл. 1) легли на конкордию (рис. 4 А). На конкордии выделяется два кластера с конкордантными возрастaми: 517 ± 5 млн лет (СКВО = 0.43) который соответствует кембрию (отдел 2, ярус 3, ≈ 521 –514 млн лет, по [17]) и 472 ± 3 млн лет (СКВО = 5.9) – соответствует раннему ордовики, Флоскому ярусу. Один анализ из ядра циркона (см. табл. 1, ан. 8.1) показал более древнюю датировку 544.6 ± 5.3 млн лет.

Проба 40 (Китарсайский комплекс). Эклогитовое тело среди меланжированных серпентинитов. Эклогиты амфиболитизированы, особенно на контактах с серпентинитами. Серпентиниты содержат прослой интенсивно осветлённых (окварцованных) пород, иногда фукситсодержащих. Среди эклогитов есть прожилки гранитов, отмечаются и полосчатые альбитизированные разности эклогитов, в которых лейкократовые полосы составляют $\approx 5\%$. Цирконы в породе образуют прозрачные розовые призматические и удлиненно-призматические кристаллы

с блестящими гранями (см. рис. 3). Внутреннее строение кристаллов ритмично-зональное. В некоторых кристаллах наблюдается ядерная часть. Полученные результаты дали конкордантный возраст (рис. 4 Б, табл. 1) 282 ± 2 млн лет (СКВО = 0.2), который соответствует раннепермскому времени. Один анализ из краевой части циркона показал омоложенный результат 241.5 ± 3.8 млн лет (см. табл. 1, проба 40, ан. 7.2).

Проба 41 (Тулепсайский комплекс) отобрана в правом борту сая, правого притока Тулепсая, в будине эклогитов каплевидной формы, расположенной среди амфиболитов с шириной выходов более 5 м. Эклогиты массивные, среднезернистые, частично амфиболитизированные. Залегают эклогиты в амфиболитах согласно. Амфиболиты плитчатые, состав мусковит-амфибол-гранат-полевошпатовый, среди акцессорных резко преобладает рутил, лейкократовые прослой составляют до 35% объёма породы. *Проба 42* отобрана в наиболее массивных и свежих амфиболитах в 3 м от будины эклогитов. *Проба 43* из эклогитов также расположенных среди амфиболитов взята в 1.45 км юго-западнее пробы 41.

Цирконы из эклогита пробы 41 представлены в основном обломками кристаллов и короткопризматическими кристаллами. Цирконы бесцветные и слабо розовые со скруглёнными рёбрами и сложным внутренним строением. Практически во всех цирконах отмечается центральное ядро и зоны с секториальностью и ритмичной зональностью по периферии (см. рис. 3). Анализы выполнены в центральных и краевых частях цирконов (см. табл. 1). Практически все полученные результаты легли на конкордию (рис. 4 В). Полученный конкордантный возраст для цирконов 523 ± 3 млн лет (СКВО = 1.8) соответствует верхам раннего кембрия (ярус 2). Анализы сделаны в ядерной, промежуточной и краевой части зёрен минерала. Четыре анализа дали более молодые возрастa – датировки 494, 489 и 429 млн лет получены из зоны более позднего обрастания кристаллов циркона (см. рис. 3, проба 41, ан. 8.2, 9.1, 2.2). Точка с анализом в краевой части циркона (см. рис. 3, проба 41, ан. 6.1) (≈ 369 млн лет) отклонилась от конкордии.

Цирконы из амфиболита пробы 42. В пробе наблюдаются разные по морфологии зёрна цирконов. Отмечаются кристаллы короткопризматического, удлиненно-призматического дипирамидального габитуса, и их обломки. Практически все зёрна с чёткими блестящими гранями, бесцветны. В пробе присутствуют

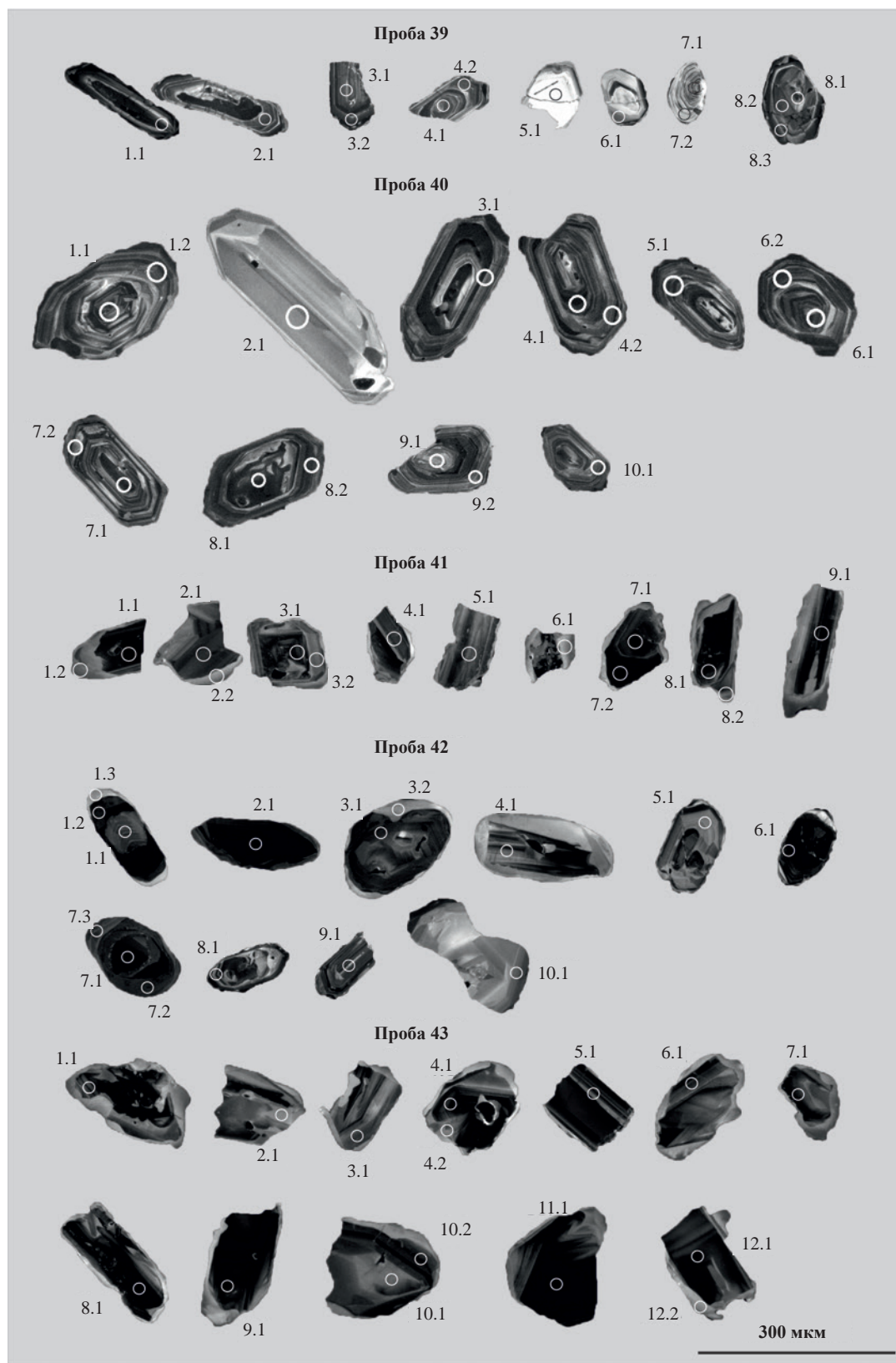


Рис. 3. Катодолюминесцентные изображения цирконов из эклогитов Восточных Мугоджар, изученных на SHRIMP II. (проба 42 – амфиболит). Кругами показано местоположение точек замеров, цифры соответствуют номерам анализов в табл. 1

Таблица 1. U–Pb (SHRIMP II)-изотопные данные для цирконов из эклогитов Мугуджар

№ ан.	$^{206}\text{Pb}_c$, %	U, г/г	Th, г/г	$^{206}\text{Pb}^*$, г/г	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, ±%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, ±%	Rho	Возраст $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, млн лет
Проба 39									
1.1	0	262	215	17	0.85	0.618±2.3	0.07549±0.75	0.3	469.1±3.4
2.1	0.15	456	221	29.9	0.5	0.621±1.9	0.07622±0.58	0.3	473.5±2.6
3.1	0.19	324	122	21.4	0.39	0.585±2.5	0.07658±0.68	0.3	475.7±3.1
3.2	0.49	973	372	63.4	0.39	0.591±2	0.07544±0.44	0.2	468.9±2
4.1	0.74	422	229	27.5	0.56	0.584±3.8	0.07526±0.75	0.2	467.7±3.4
4.2	0	487	220	31.8	0.47	0.613±1.8	0.07596±0.56	0.3	472±2.6
5.1	0.28	70	31	4.98	0.45	0.674±5.2	0.0826±1.4	0.3	511.5±6.7
6.1	0	223	82	16.1	0.38	0.684±2.7	0.08405±0.8	0.3	520.3±4
7.1	0	314	181	22.4	0.6	0.659±2.3	0.08318±0.69	0.3	515.1±3.4
7.2	0.2	105	54	7.51	0.53	0.671±4.3	0.08333±1.2	0.3	516±5.8
8.1	4.52	271	151	21.6	0.58	0.705±9.8	0.08815±1	0.1	544.6±5.3
8.2	0.15	353	222	23.3	0.65	0.584±3	0.07678±0.68	0.2	476.9±3.1
8.3	0	453	61	24.8	0.14	0.528±2.3	0.06372±1.2	0.5	398.2±4.7
Проба 40									
1.1	5.99	740	987	29.8	1.38	0.315±9.1	0.04403±1.7	0.2	277.7±4.6
1.2	1.24	854	428	33.8	0.52	0.339±3.7	0.04551±1.1	0.3	286.9±3.1
2.1	0	144	197	5.68	1.41	0.323±4.1	0.04596±1.5	0.4	289.6±4.3
3.1	0.26	818	354	30.7	0.45	0.3142±2.6	0.04356±1.1	0.4	274.9±3
4.1	0.1	1079	465	41.7	0.45	0.3175±2.1	0.04497±1.1	0.5	283.6±3
4.2	0.06	1021	446	39.4	0.45	0.3251±2	0.04488±1.1	0.6	283±3.1
5.1	0.14	797	607	30.2	0.79	0.3085±2.4	0.04404±1.1	0.5	277.8±3
6.1	0	816	409	31.9	0.52	0.3265±2	0.04554±1.1	0.6	287.1±3.2
6.2	0.42	1098	815	42.2	0.77	0.3226±2.5	0.04452±1.1	0.4	280.8±2.9
7.1	3.39	1121	694	43.5	0.64	0.314±9.9	0.0436±1.2	0.1	275.1±3.2
7.2	7.55	979	1133	34.7	1.2	0.252±30	0.03817±1.6	0.1	241.5±3.8
8.1	0	2151	4080	83.8	1.96	0.3269±1.4	0.04532±1	0.7	285.7±2.9
8.2	0.73	675	344	25.5	0.53	0.318±3.8	0.04367±1.1	0.3	275.5±3.1
9.1	0.32	315	196	12.3	0.64	0.333±4.1	0.0453±1.3	0.3	285.6±3.6
9.2	0.27	415	239	15.7	0.6	0.314±3.4	0.04397±1.2	0.4	277.4±3.3
10.1	0	621	389	24.3	0.65	0.3219±2.2	0.04545±1.2	0.5	286.5±3.3
Проба 41									
1.1	0	367	348	26.4	0.98	0.667±2.3	0.08391±0.72	0.3	519.4±3.6
1.2	0.72	46	9	3.44	0.2	0.687±9.2	0.0857±1.9	0.2	530.1±9.9
2.1	0.15	212	85	15.5	0.42	0.683±3.2	0.08519±0.91	0.3	527±4.6
2.2	0	10	3	0.598	0.28	0.538±15	0.0687±4.9	0.3	429±20
3.1	0	271	176	19.5	0.67	0.655±2.8	0.08394±0.96	0.3	519.6±4.8
3.2	0	123	46	8.86	0.39	0.659±4.2	0.0839±1.2	0.3	519.6±6.1
4.1	0	270	228	19.3	0.87	0.656±2.8	0.08351±0.95	0.3	517±4.7

Таблица 1. Окончание

№ ан.	$^{206}\text{Pb}_c$, %	U, г/г	Th, г/г	$^{206}\text{Pb}^*$, г/г	$^{232}\text{Th}/$ ^{238}U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, ±%	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U , ±%	Rho	Возраст $^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U , млн лет
5.1	0	99	46	7.16	0.48	0.674±4.5	0.0842±1.3	0.3	521.4±6.7
6.1	0	2	1	0.0858	0.34	1.31±27	0.0589±12	0.5	369±44
7.1	0.04	1183	521	87	0.46	0.6675±1.4	0.08555±0.52	0.4	529.2±2.7
7.2	0	542	293	39	0.56	0.67±1.9	0.08359±0.61	0.3	517.5±3
8.1	0.58	64	16	4.76	0.27	0.674±7.6	0.0865±1.7	0.2	535.1±8.7
8.2	0.21	443	315	30.4	0.73	0.599±3	0.07965±0.7	0.2	494±3.3
9.1	0	469	393	31.8	0.87	0.611±2.2	0.07882±0.77	0.3	489.1±3.6
Проба 42									
1.1	0.2	161	45	27.2	0.29	2.085±2.5	0.1963±0.91	0.4	1155.5±9.6
1.2	5.06	11	0	0.594	0	0.34±75	0.0619±5.6	0.1	387±21
1.3	0.34	395	3	20.7	0.01	0.478±3.5	0.0609±0.78	0.2	381.1±2.9
2.1	0	701	350	51.5	0.52	0.675±1.6	0.08553±0.52	0.3	529±2.7
3.1	0	180	55	12	0.32	0.604±3.5	0.07783±1.2	0.3	483.2±5.5
3.2	0	11	0	0.587	0.02	0.538±15	0.0625±4.3	0.3	391±16
4.1	0.11	219	243	16.5	1.14	0.688±3.3	0.0875±1.4	0.4	540.6±7.2
5.1	0.39	84	51	7.65	0.63	0.887±5.3	0.1062±1.4	0.3	650.5±8.5
6.1	0.83	594	301	25.4	0.52	0.37±5.7	0.04937±0.73	0.1	310.7±2.2
7.1	0.08	494	633	48.8	1.33	0.99±1.8	0.11504±0.59	0.3	701.9±3.9
7.2	0.13	288	4	14.8	0.01	0.474±3.3	0.05981±0.88	0.3	374.5±3.2
7.3	0	206	2	10.9	0.01	0.483±3.6	0.06169±1	0.3	385.9±3.8
8.1	0.15	346	135	22.6	0.4	0.6±3.5	0.07617±0.87	0.2	473.3±4
9.1	0.19	214	130	14.1	0.63	0.595±3.7	0.07688±1.1	0.3	477.5±5
10.1	0.18	207	87	10.6	0.44	0.433±4.1	0.05939±1	0.3	371.9±3.7
Проба 43									
1.1	0.13	176	64	13.1	0.37	0.664±3.3	0.08644±0.93	0.3	534.5±4.7
2.1	0.72	32	7	2.3	0.24	0.637±9.7	0.0836±2.2	0.2	517±11
3.1	0	91	28	6.47	0.31	0.68±4.4	0.0826±1.3	0.3	511.8±6.4
4.1	0	1044	734	75	0.73	0.6643±1.3	0.08361±0.43	0.3	517.6±2.2
4.2	0.47	47	13	3.41	0.28	0.65±7.4	0.084±1.8	0.2	520.2±9
5.1	0.82	237	88	17.7	0.38	0.655±4.9	0.08626±0.84	0.2	533.4±4.3
6.1	0.21	193	81	14.3	0.43	0.678±3.5	0.08577±1	0.3	530.5±5.3
7.1	0	114	31	8.26	0.28	0.646±4	0.08454±1.2	0.3	523.2±5.9
8.1	0.5	145	40	10.5	0.28	0.639±5.7	0.08381±1.1	0.2	518.8±5.4
9.1	0.19	104	24	7.77	0.24	0.688±5.1	0.0871±1.4	0.3	538.5±7.4
10.1	0.62	173	60	12.6	0.36	0.638±5.7	0.08421±1	0.2	521.2±5
10.2	0	14	5	1	0.38	0.812±9.8	0.0836±3.5	0.4	517±17
11.1	0.8	100	27	7.26	0.27	0.627±7.6	0.0835±1.3	0.2	516.7±6.6
12.1	1.09	653	253	46.9	0.4	0.631±3.3	0.08269±0.56	0.2	512.1±2.8
12.2	0	39	9	2.51	0.23	0.554±7.7	0.0746±2.1	0.3	463.8±9.5

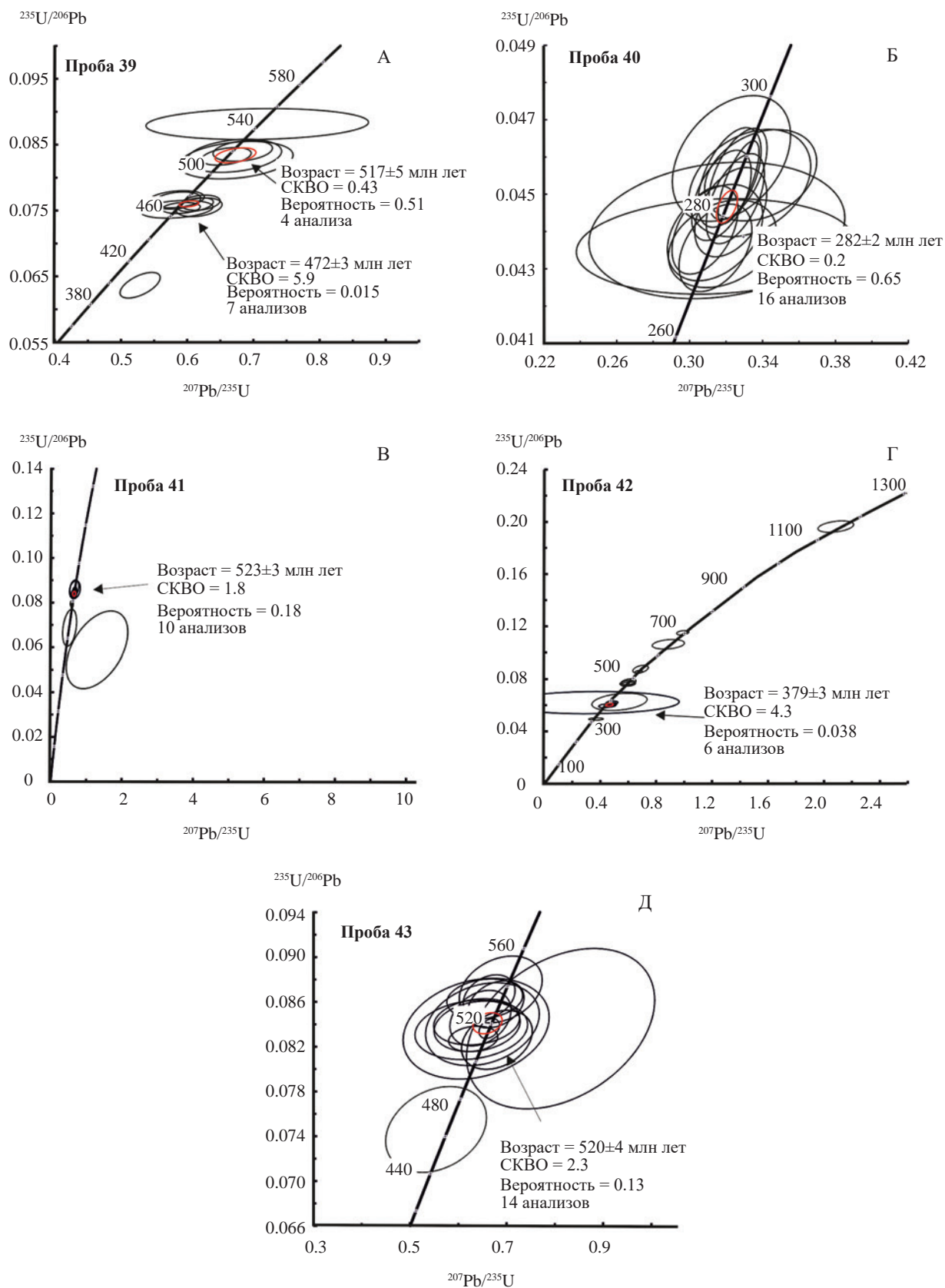


Рис. 4. Изотопные U–Pb-диаграммы с конкордией, построенные по результатам масспектрометрического изучения зёрен циркона из эклогитов Мугоджар. А – проба 39; Б – проба 40; В – проба 41; Г – проба 42 (амфиболит); Д – проба 43

также вытянутые зёрна со сглаженными рёбрами (см. рис. 3). В кристаллах наблюдается секториальность и зональность. Наблюдаются цирконы, имеющие центральную, ядерную часть и более позднее дорастание. В периферийных зонах четырёх зёрен циркона, конкордантный возраст (рис. 4 Г, табл. 1) составил 379 ± 3 млн лет (СКВО = 4.3), соответствующий франскому веку.

Цирконы из эклогита пробы 43 представлены вытянутыми кристаллами и их обломками (см. рис. 3). Кристаллы с округлыми рёбрами, следами растворения, бесцветные. Внутри кристаллов отмечается ядерная часть и периферийная. В периферийной зоне зёрен отмечается ритмическая зональность. Полученные результаты (табл. 1, рис. 4 Д) дали конкордантный возраст 520 ± 4 млн лет (СКВО = 2.3). В краевой части 1 обломка циркона получен более молодой возраст — 464 млн лет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Исследованные нами метаморфиты, представленные преимущественно омфацитом с содержанием до 47% жадеитового минала, глаукофаном и альмандином, содержащим до 18% пиропового минала, а также парагонитом, клиноцоизитом, большим количеством акцессорного рутила, судя по ассоциации, являются достаточно типичными эклогитами, подвергшимися ретроградному метаморфизму с образованием большого количества Na-амфибола и альбит-актинолитовых симплектитов.

Полученные результаты изотопного U—Pb-датирования цирконов из эклогитов Восточных Мугоджар показали весьма сложную историю их образования и преобразования, детальная расшифровка которой, по-видимому, будет возможна лишь в будущем, при использовании также и других изотопно-геохронометрических систем (Rb—Sr, Sm—Nd и др.). Однако представленные в статье данные уже сейчас доказывают главное — то, что метаморфические комплексы Мугоджар не являются раннепротерозойскими, или рифейскими образованиями (как это полагали ранее), но представляют собой ниже-среднепалеозойские комплексы средней части земной коры. Т.е. эти метаморфиты по своей природе не предполагавшийся здесь когда-то микроконтинент Мадагаскарского типа [7], и не часть фундамента Русской платформы [14], а являются фрагментами глубинной части островодужной системы восточного сектора Урала, которые позднее (в среднем-позднем

триасе) были выведенные на близ-поверхностный уровень при подъёме и эрозии отдельных районов Урала (детальнее — см. [6]). Отметим, что в породах восточного (палеостроводужного) сектора Урала (т.е. восточнее Главного Уральского разлома) на сегодня вообще не известно ни одной надёжной допалеозойской датировки [5].

Из 4 проб эклогитов, близкие (и наиболее “древние”) значения конкордантного возраста имеют пробы 39, 41 и 43 с датировками 517 ± 5 млн лет, 523 ± 3 млн лет и 520 ± 4 млн лет соответственно. Полученный возраст (в среднем 520 ± 4 млн) примерно отвечает верхней границе раннего кембрия (Терренувского отдела) [17] и, вероятно, *соответствует возрасту протолита*. И хотя кембрийские образования на Урале сохранились плохо, но все же, например, базальты кембрия известны в Сакмарской зоне Южного Урала, в районе города Медногорска [12].

Наиболее молодые цирконы из эклогитов Мугоджар имеют чётко проявленный возраст 282 ± 2 млн лет (ранняя пермь, проба 40), по всей видимости, отвечающий этапу коллизии и связанных с ним гранитных массивов [2, 3]. В данном случае это и возраст формирования Бугетт-сайского разлома.

Остальные две конкордантные датировки: 472 ± 3 млн лет (нижний-средний ордовик, проба 39) и 379 ± 3 млн лет (франский век, проба 42), очевидно, отражают время основных этапов метаморфизма. Как отмечалось [15], “франский” возраст метаморфитов Мугоджар совпал с возрастом главной фазы высокобарического метаморфизма в зоне Главного Уральского глубинного разлома на Южном Урале (максютовский комплекс — см. [18]), равно как и с возрастом метаморфитов высоких ступеней на северо-востоке Среднего Урала (салдинский комплекс — см. [11]). Салдинский комплекс, хотя и расположен в 1100 км севернее, но находится в той же зоне, что и рассматриваемые метаморфиты Восточных Мугоджар. Представленные выше данные заставляют считать франским возраст метаморфизма амфиболитовой фации Восточных Мугоджар. Это соответствует и сведениям [8], что возраст новообразованных (т.е. не обломочных) цирконов в биотит-содержащих кварц-полевошпатовых гнейсах южномугоджарской серии также составил 373 ± 4 млн лет. Конкордантная датировка 472 ± 3 млн лет (проба 39), по нашим данным, соответствует возрасту высокобарического метаморфизма Мугоджар.

Отметим, что в пробе 42 (амфиболиты) ядерные части 4 кристаллов дали древние датировки 1155, 702 и 483 млн лет. Центральные зоны цирконов со сглаженными рёбрами имеют возраст 650, 541 и 529 млн лет. Два циркона призматического габитуса показали близкие возраста 471 и 478 млн лет. Присутствие древних, и при этом разновозрастных цирконов, к тому же, по-видимому, со следами окатывания, свидетельствует о первично-осадочной природе амфиболита данной пробы.

БЛАГОДАРНОСТИ

За помощь и поддержку авторы выражают свою искреннюю признательность коллегам Ю.В. Ерохину, Л.А. Карстен и И.А. Пелевину (ИГГ), а также А.Н. Ларионову из ЦИИ ВСЕГЕИ (С.-Петербург) за проведенные анализы цирконов, и неизвестному рецензенту — за замечания, способствовавшие улучшению статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы № 123011800014-3 государственного задания ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков В. М. Высокобарические комплексы подвижных поясов. М.: Наука, 1988. 208 с.
2. Геологическая карта Казахской ССР. М. 1:500 000. Серия Тургайско-Мугоджарская. Алма-Ата, 1981. 228 с.
3. Голионко Б. Г., Рязанцев А. В. Деформации и структурная эволюция метаморфических комплексов Талдыкской антиформы Восточно-Мугоджарской зоны Урала (Западный Казахстан) // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 1. С. 48–59.
4. Ефимов И. А., Бурд Г. И. Региональный метаморфизм, возраст и условия формирования некоторых глубинных пород докембрия Мугоджар // Советская геология. 1970. № 11. С. 36–56.
5. Иванов К. С., Панов В. Ф., Лиханов И. И., Козлов П. С., Пономарев В. С., Хиллер В. В. Докембрий Урала // Горные ведомости. 2016. Т. 148. № 9. С. 4–21.
6. Иванов К. С., Пучков В. Н. Структурно-формационные зоны Уральского складчатого пояса: обзор данных и развитие новых идей // Геотектоника. 2022. № 6. С. 78–113.
7. Иванов С. Н., Пучков В. Н., Иванов К. С., Самаркин Г. И., Семенов И. В., Пумпянский А. И., Дымкин А. М., Полтавец Ю. А., Русин А. И.,

- Краснобаев А. А. Формирование земной коры Урала. М.: Наука, 1986. 246 с.
8. Краснобаев А. А., Баянова Т. Б. Новые данные по цирконовой геохронологии Талдыкского блока Мугоджар // Ежегодник-2005. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 297–300.
9. Краснобаев А. А., Давыдов В. А. Цирконовая геохронология Талдыкского блока Мугоджар // Доклады Академии наук. 1999. Т. 366. № 1. С. 95–99.
10. Миловский А. В., Гетлинг Р. В., Зверев А. Т., Рошкова Г. Р., Свальнова В. И. Докембрий и нижний палеозой Западного Казахстана. М.: МГУ, 1977. 268 с.
11. Петров Г. А., Ронкин Ю. Л., Маслов А. В., Свяжичина И. А., Рыбалка А. В., Лепихина О. П. Время начала коллизии на Среднем и северном Урале // ДАН. 2008. Т. 422. № 3. С. 365–370.
12. Пучков В. Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Гилем, 2000. 146 с.
13. Русин А. М. Китарсаяская экологит-перидотитовая ассоциация Мугоджар // Ежегодник-1995. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1996. С. 99–103.
14. Русин А. И. Метаморфические комплексы Урала и проблема эволюции метаморфизма в полном цикле развития литосферы подвижных поясов. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.г.-м.н. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. 46 с.
15. Рязанцев А. В., Голионко Б. Г., Котов А. Б., Скобленко А. В., Стифеева М. В., Плоткина Ю. В., Сальникова Е. Б., Корешкова М. Ю., Мачев Ф. Возраст и термальная история экологитов Тулепсайского комплекса Восточных Мугоджар (Западный Казахстан) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 1. С. 5–13.
16. Юриш В. В., Улукпанов К. Т. Геодинамика палеозоя Казахского Урала. Актобе: ТОО АКТЮБНИГРИ, 2020. 365 с.
17. Cohen K. M., Harper D. A. T., Gibbard P. L., Car N. The ICS International Chronostratigraphic Chart, February 2022. Available from: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2022-02.pdf>.
18. Glodny J., Bingen B., Austrheim H., Molina J. F., Rusin A. Precise Eclogitization Ages Deduced from Rb/Sr Mineral Systematics: The Maksyutov Complex, Southern Urals, Russia // Geoch. Acta. 2002. V. 66 (7). P. 1221–1235.
19. Ludwig K. R. ISOPLOT 3.00. A User's Manual // Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2003. № 4. 2455 Ridge Road, Berkeley. CA 94709. USA. 70 p.
20. Williams I. S. U–Th–Pb geochronology by ion microprobe. Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes // Rev. Econ. Geol. 1998. V. 7. P. 1–35.

ISOTOPIC U–Pb-SHRIMP DATING OF MUGODZHARI ECLOGITES (KAZAKHSTAN)

© 2025 K. S. Ivanov^a, V. S. Ponomarev^{a, #}, Corresponding Member of the RAS V. N. Puchkov^a, D. A. Khanin^b

^a*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia*

^b*Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*
[#] *E-mail: p123v@yandex.ru*

In the extreme south of the Urals, zircons from eclogites and amphibolite were dated in metamorphites of the East Mugodzhari zone. Of the 4 eclogite samples, close (and the most “ancient” – 520 ± 4 million years) concordant age values were obtained in 3 samples, which probably corresponds to the age of the protolith. Concordant dates of 472 ± 3 million years and 379 ± 3 million years reflect the time of the main stages of metamorphism of the East Mugodzhari, the more ancient – high-pressure, and the second – amphibolite facies metamorphism. The presence of ancient and at the same time different-aged zircons, probably with traces of rounding, indicates the primary sedimentary nature of the studied amphibolites. The youngest zircons from the Mugodzhari eclogites have an age of 282 ± 2 million years, corresponding to the collision stage. The obtained data show that the Mugodzhari metamorphic complexes are not Early Proterozoic or Riphean formations (as was previously believed), but represent Lower-Middle Paleozoic complexes of the middle part of the earth's crust. That is, these metamorphites by their nature are fragments of the deep part of the island-arc system of the eastern sector of the Urals, which were later brought to a near-surface level during the rise and erosion of individual regions of the Urals.

Keywords: eclogite, amphibolite, zircon, U–Pb age, Mugodzhari, Urals, Kazakhstan

ПРИЛОЖЕНИЕ. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИНЕРАЛОВ ИЗ ЭКЛОГИТОВ МУГОДЖАР (КАЗАХСТАН)

Химический состав минералов определялся на рентгеноспектральном микроанализаторе Camebax SX50 (кафедра минералогии Геологического факультета МГУ, аналитик Д.А. Ханин) при ускоряющем напряжении 15 кВ и силе тока зонда 30 нА. В качестве эталонов на REE использовались соответствующие фосфаты, на Na, Si – чкаловит, Mg, Ca, Fe – роговая обманка, Al – альбит, K – ортоклаз, Ti – KTiPO₅ синт., Cr – магнезиохромит, V – ванадий, Mn – MnTiO₅, Co – кобальтин, Ni – NiO, Sr – целестин, Ba – барит. Содержание воды прямым методом не осуществлялось.

Таблица 1. Химический состав (в мас. %) минералов из эклогитов

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	MgO	FeO	MnO	SrO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
Альмандин												
1	37.86	—	21.83	—	4.50	31.15	0.34	—	4.33	—	—	100.01
2	37.69	—	21.60	—	3.04	32.38	0.56	—	4.73	—	—	100.00
3	37.81	—	21.56	—	3.51	29.00	0.19	—	7.56	—	—	99.63
4	38.07	0.15	21.66	—	2.32	28.22	0.28	—	9.30	—	—	100.00
5	38.04	0.23	21.87	—	3.16	27.30	0.24	—	9.16	—	—	100.00
6	38.16	—	21.88	—	4.43	28.86	0.20	—	6.47	—	—	100.00
7	37.75	—	21.72	—	4.32	31.06	0.45	—	4.71	—	—	100.01
8	38.03	0.16	21.65	—	3.24	27.65	0.20	—	9.06	—	—	99.99
9	37.98	—	21.75	—	3.59	28.74	0.22	—	7.72	—	—	100.00
10	37.54	0.39	21.03	—	3.13	27.78	0.84	—	9.18	—	—	99.89
11	37.14	0.20	20.96	—	2.91	28.62	0.87	—	9.08	—	—	99.78
12	38.12	0.39	21.23	—	3.84	28.30	0.62	—	8.87	—	—	101.37
13	37.57	—	21.06	—	3.12	29.63	1.11	—	7.84	—	—	100.33
14	37.90	—	21.17	—	4.35	31.08	0.67	—	5.12	—	—	100.29
Глаукофан												
15	58.16	—	11.71	—	10.69	8.92	0.05	—	0.32	7.77	—	97.62
16	57.92	—	11.36	—	10.62	9.44	—	—	0.74	7.72	—	97.80
17	57.85	—	11.50	—	9.58	10.72	—	—	0.19	7.88	—	97.72
18	56.59	—	10.89	—	11.17	9.59	—	—	1.58	7.31	—	97.13
19	56.10	0.11	11.37	—	10.14	10.63	—	—	1.56	7.25	—	97.16
Омфацит												
20	56.88	—	10.04	0.10	8.37	5.05	—	—	13.22	6.64	—	100.30
21	56.83	—	10.52	—	8.86	4.44	—	—	13.62	7.21	—	101.48
22	57.00	0.11	10.05	—	7.91	5.40	—	—	12.57	6.63	—	99.67
23	56.19	0.07	11.02	0.10	8.32	5.53	0.06	—	12.76	7.16	—	101.21
24	55.85	—	10.11	0.10	8.54	4.99	—	—	13.22	7.25	—	100.06
25	55.58	0.10	10.98	0.09	7.20	5.63	0.07	—	12.09	7.96	—	99.70
26	54.96	0.23	11.95	0.15	6.44	6.41	0.05	—	10.24	8.58	—	99.01
27	55.99	0.16	11.49	—	7.40	6.08	—	—	10.48	8.33	—	99.93
28	56.48	0.18	11.23	0.11	7.04	6.03	0.09	—	11.31	8.42	—	100.89
29	56.72	0.25	11.94	0.08	7.00	5.48	—	—	10.93	8.63	—	101.03

Таблица 1. Окончание

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	MgO	FeO	MnO	SrO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
Актинолит												
30	51.81	0.09	4.39	0.11	11.46	18.13	0.28	—	10.71	1.63	0.14	98.75
31	50.73	0.07	4.24	0.24	12.10	17.86	0.29	0.09	11.58	1.21	0.11	98.28
Амфиболы ряда ферропаргасит–ферроэденит												
32	41.45	0.25	12.29	0.19	4.64	26.09	0.25	—	10.56	2.94	0.35	99.01
33	41.03	0.14	11.7	0.09	4.54	25.97	0.21	—	10.29	2.87	0.35	97.19
34	42.69	0.05	9.96	0.00	5.56	25.82	0.26	—	10.83	2.52	0.36	98.05
Хлорит												
35	24.66	0.79	19.25	—	10.80	29.72	0.23	—	0.81	0.18	—	86.44
36	26.06	0.26	16.16	—	11.12	31.27	0.38	0.29	0.54	0.22	—	86.30
37	28.27	—	19.25	0.12	23.95	13.79	0.09	—	0.10	0.08	—	85.65
38	28.99	—	19.49	—	23.58	14.50	—	—	0.24	0.14	—	86.94
Мусковит												
39	50.50	0.30	27.00	0.16	3.32	2.57	—	—	0.11	0.71	11.05	95.72
40	50.62	0.25	27.10	0.12	3.31	2.63	—	—	—	0.68	10.89	95.60
Цоизит												
41	39.56	—	32.40	0.10	0.06	1.08*	—	0.16	24.58	—	—	97.94
42	39.22	0.05	31.69	0.22	—	2.81*	—	0.42	24.04	0.07	—	98.52
Клиноцоизит–эпидот												
43	37.73	0.11	26.63	0.12	—	7.90*	0.11	0.00	23.21	0.06	—	95.87
44	38.20	0.00	25.93	0.41	—	9.49*	0.10	0.16	23.56	0.00	—	97.85
Парагонит												
45	47.46	0.00	37.00	0.11	0.89	0.56	—	—	0.16	7.66	0.94	94.78
46	46.68	0.11	37.48	0.33	0.50	0.64	—	—	0.10	7.25	1.22	94.31
Титанит												
47	30.44	37.48	1.48	0.77	—	0.27	—	0.06	28.59	0.08	—	99.17
48	30.59	38.13	1.61	0.50	—	0.24	0.08	0.14	28.67	0.05	—	100.01
Рутил												
49	0.16	97.63	0.07	0.97	—	1.03	—	—	—	—	—	99.86
50	—	98.11	0.07	2.07	—	0.25	—	—	—	—	—	100.50
51	—	86.42	—	0.81	—	12.51	1.27	—	—	—	—	101.01
Ильменит												
52	0.26	53.89	0.12	0.34	—	39.80	4.71	—	0.25	—	—	99.37
Альбит												
53	67.32	—	19.10	—	—	0.68	—	—	0.15	12.21	—	99.46
54	69.13	—	19.12	—	—	0.54	—	—	0.27	11.67	—	100.73
Кальцит												
55	0.34	—	—	—	—	1.55	0.46	0.14	50.50	—	—	52.99
56	—	—	—	—	—	0.74	0.41	0.08	51.48	—	—	52.71

Примечание: здесь и в табл. 2 – анализы: 32, 33 – ферропаргасит; 34 – ферроэденит; 35, 36 – шамозит; анализы 37, 38 – клинохлор. В ан. 3 – дополнительно определено Cr₂O₃ 0.37 мас. % (0.02 ф.е.). * – содержание в минерале Fe₂O₃.

Таблица 2. Кристаллохимические пересчеты (в ф.е.) минералов из эклогитов

№	Si	Ti	Al	V	Mg	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn	Sr	Ca	Na	K
Альмандин												
1	2.99	—	2.03	—	0.53	2.06		0.02	—	0.37	—	—
2	3.01	—	2.03	—	0.36	2.16	—	0.04	—	0.40	—	—
3	2.99	—	2.01	—	0.41	1.92	—	0.01	—	0.64	—	—
4	3.02	0.01	2.02	—	0.27	1.87	—	0.02	—	0.79	—	—
5	3.00	0.01	2.03	—	0.37	1.80	—	0.02	—	0.77	—	—
6	3.00	—	2.03	—	0.52	1.90	—	0.01	—	0.55	—	—
7	2.98	—	2.02	—	0.51	2.05	0.01	0.03	—	0.40	—	—
8	3.00	0.01	2.01	—	0.38	1.82	—	0.01	—	0.77	—	—
9	3.00	—	2.02	—	0.42	1.90	—	0.02	—	0.65	—	—
10	2.97	0.02	1.96	—	0.37	1.79	0.05	0.06	—	0.78	—	—
11	2.95	0.01	1.96	—	0.35	1.79	0.12	0.06	—	0.77	—	—
12	2.97	0.02	1.95	—	0.45	1.76	0.08	0.04	—	0.74	—	—
13	2.97	—	1.96	—	0.37	1.87	0.10	0.07	—	0.66	—	—
14	2.99	—	1.97	—	0.51	2.00	0.05	0.05	—	0.43	—	—
Глаукофан												
15	7.93	—	1.88	—	2.17	0.91	0.11	0.01	—	0.05	2.05	—
16	7.91	—	1.83	—	2.16	0.93	0.15	—	—	0.11	2.04	—
17	7.94	—	1.86	—	1.96	1.12	0.11	—	—	0.03	2.10	—
18	7.81	—	1.77	—	2.30	0.87	0.24	—	—	0.23	1.96	—
19	7.78	0.01	1.86	—	2.10	1.03	0.20	—		0.23	1.95	
Омфацит												
20	2.02	—	0.42	—	0.44	0.15	—	—	—	0.50	0.46	—
21	1.98	—	0.43	—	0.46	0.04	0.09	—	—	0.51	0.49	—
22	2.04	—	0.43	—	0.42	0.16	—	—	—	0.48	0.46	—
23	1.97	—	0.46	—	0.44	0.08	0.08	—	—	0.48	0.49	—
24	1.98	—	0.42	—	0.45	0.03	0.12	—	—	0.50	0.50	—
25	1.98	—	0.46	—	0.38	0.04	0.13	—	—	0.46	0.55	—
26	1.97	0.01	0.50	—	0.34	0.05	0.15	—	—	0.39	0.60	—
27	1.98	—	0.48	—	0.39	0.00	0.13	0.18	—	0.40	0.57	—
28	1.98	0.01	0.47	—	0.37	0.05	0.13	—	—	0.43	0.57	—
29	1.98	0.01	0.49	—	0.37	0.05	0.12	—	—	0.41	0.59	—
Актинолит												
30	7.51	0.01	0.75	0.01	2.48	1.80	0.40	0.03	—	1.66	0.46	0.03
31	7.43	0.01	0.73	—	2.64	1.89	0.30	0.04	0.01	1.82	0.34	0.02

Таблица 2. Окончание

№	Si	Ti	Al	V	Mg	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn	Sr	Ca	Na	K
Амфиболы ряда ферропаргасит–ферроэденит												
32	6.36	0.03	2.22	0.02	1.06	2.92	0.43	0.03	—	1.74	0.87	0.07
33	6.41	0.02	2.16	0.01	1.06	2.94	0.45	0.03	—	1.72	0.87	0.07
34	6.61	0.01	1.82	—	1.28	3.01	0.34	0.03	—	1.80	0.76	0.07
Хлорит												
35	2.73	0.07	2.51	—	1.78	2.75	—	0.02	—	0.10	0.04	—
36	3.00	0.02	2.19	—	1.91	2.71	—	0.04	—	0.07	0.05	—
37	2.87	—	2.30	0.01	3.62	1.17	—	0.01	—	0.01	0.02	—
38	2.94	—	2.33	—	3.57	1.11	—	—	—	0.03	0.03	—
Мусковит												
39	3.38	0.02	2.13	0.01	0.33	0.14	—	—	—	0.01	0.09	0.94
40	3.39	0.01	2.14	0.01	0.33	0.15	—	—	—	—	0.09	0.93
Цоизит												
41	3.01	—	2.91	0.01	0.01	—	0.06	—	0.01	2.00	—	—
42	2.99	—	2.85	0.01	—	—	0.16	—	0.02	1.96	—	—
Клиноцоизит–эпидот												
43	3.01	0.01	2.50	0.01	—	—	0.47	0.01	—	1.98	0.01	—
44	3.01	—	2.41	0.02	—	—	0.56	0.01	0.01	1.99	—	—
Парагонит												
45	3.04	—	2.80	0.01	0.09	0.03	—	—	—	0.01	0.95	0.08
46	3.02	0.01	2.86	0.01	0.05	0.04	—	—	—	0.01	0.91	0.10
Титанит												
47	0.99	0.92	0.06	0.02	—	—	—	—	—	1.00	0.01	—
48	0.99	0.93	0.06	0.01	—	—	—	—	—	1.00	—	—
Рутил												
49	—	0.98	—	0.01	—	0.01	—	—	—	—	—	—
50	—	0.97	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
51	—	0.84	—	0.01	—	0.14	0.01	—	—	—	—	—
Ильменит												
52	0.01	1.03	—	0.01	—	0.85	0.10	—	—	0.01	—	—
Альбит												
53	2.95	—	0.99	—	—	0.03	—	—	—	0.01	1.04	—
54	3.01	—	0.98	—	—	0.02	—	—	—	0.01	0.98	—
Кальцит												
55	0.01	—	—	—	—	0.02	0.01	—	—	0.96	—	—
56	—	—	—	—	—	0.01	0.01	—	—	0.98	—	—

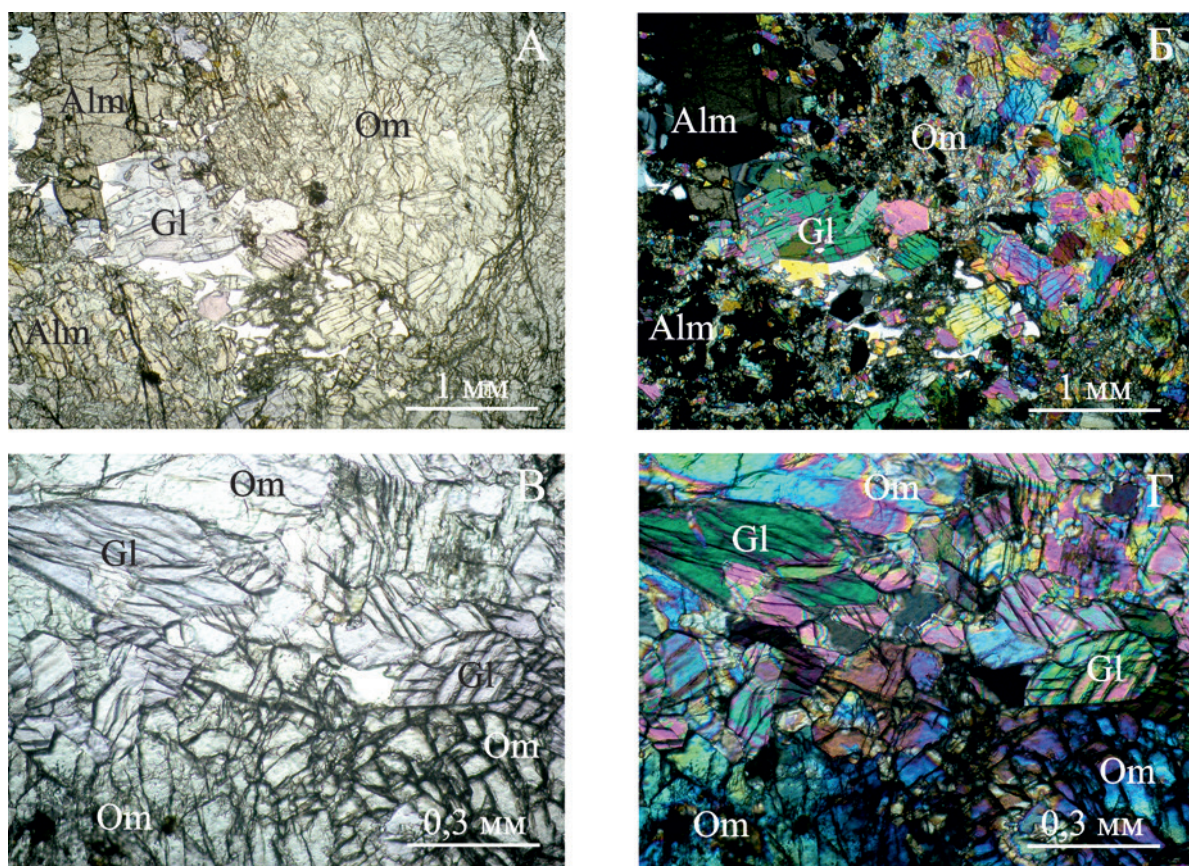


Рис. Эклогит Тулепсайского комплекса Восточных Мугоджар (проба 43). В проходящем свете (А), в поляризованном свете (Б). Омфацит и глаукофан из эклогита (проба 43); в проходящем свете (В), в поляризованном свете (Г). Alm – альмандин, Om – омфацит, Gl – глаукофан