

М. В. НАУМОВ, А. Н. ЛАРИОНОВ, В. Л. МАСАЙТИС,
М. С. МАЩАК (ВСЕГЕИ), С. В. БОГДАНОВА (Lund University, Sweden),
С. Л. ПРЕСНЯКОВ, Е. Н. ЛЕПЕХИНА (ВСЕГЕИ)

ИЗОТОПНОЕ ДАТИРОВАНИЕ УДАРНО-МЕТАМОРФИЗОВАННЫХ ПОРОД ФУНДАМЕНТА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (РАЗРЕЗ ВОРОТИЛОВСКОЙ ГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ)

Представлены результаты изотопно-геохронологического исследования U-Pb методом по циркону из ударно-метаморфизованных кристаллических пород центрального поднятия Пучеж-Катунской импактной структуры, которые являются первыми надежными геохронологическими данными для кристаллического фундамента центральной части Восточно-Европейской платформы. Выделены два этапа эволюции фундамента: 2540–2530 млн лет – формирование толщи плагиогнейсов и амфиболитов в условиях амфиболитовой фации, отвечающее границе архея и протерозоя; 2020–1980 млн лет – анатексис и гранитизация архейского комплекса. Юрское импактное событие привело лишь к частичным нарушениям изотопно-геохимической системы ранних цирконов. Хотя ударный метаморфизм высоких ступеней ($P > 35$ ГПа) приводит к определенным потерям радиогенного свинца, полного «стирания» начальной изотопной информации не происходит и возможность изотопного датирования пород мишени сохраняется.

Ключевые слова: *Восточно-Европейская платформа, датирование U-Pb методом по циркону, Пучеж-Катунская импактная структура, Воротиловская глубокая скважина, ранний докембрий, ударный метаморфизм.*

Results of the U-Pb isotopic-geochronologic investigation of zircon from shocked metamorphic and magmatic rocks composing the central uplift of the Puchezh-Katunki impact structure are submitted. These results are the first representative geochronologic data for the crystalline basement of the central part of the East European platform. Two main events are revealed: 2540–2530 Ma – formation of the plagiogneiss-amphibolite Late Archean sequence; 2020–1980 Ma – anatexis and granitization of the Archean Complex. The Jurassic meteorite impact influenced insignificantly to isotope system of primary zircons from crystalline rocks. Although the high-level shock metamorphism ($P > 35$ GPa) causes some loss of radiogenic Pb from zircons, no full erasing of previous isotopic information is occurring. Thus, shocked zircon preserves a possibility to date ancient events.

Keywords: *East European Platform, U-Pb dating on zircon, Puchezh-Katunki impact structure, Vorotilovo deep hole, Early Precambrian, shock metamorphism.*

Введение. В 90-х годах прошлого столетия почти в центре Восточно-Европейской платформы НПО «Недра» была пробурена Воротиловская глубокая скважина (ВГС). Она заложена в пределах т. н. Воротиловского выступа – центрального поднятия Пучеж-Катунской астроблемы диаметром 80 км – и вскрыла кристаллические породы фундамента платформы, залегающие на отметках 500–5374 м [2, 6]. Амплитуда центрального поднятия относительно уровня поверхности фундамента, перекрытого осадочным чехлом в прилегающих районах, оценивается в 2,6 км; его кристаллические породы первоначально (до импактного события, происшедшего в юре) находились на глубинах более 7 км и были подняты в стадию модификации в процессе импактного кратерообразования. ВГС позволила получить данные о составе нормально залегающего фундамента на глубинах 7–12 км. В разрезе вскрытой ВГС части кристаллического фундамента (рис. 1) преобладают амфиболовые, биотитовые и биотит-амфиболовые гнейсы с линзами амфиболитов; ниже 3200 м появляются линзы кварцитов и кварцито-гнейсов, высокоглиноземистых гнейсов, кальцифиоров и диопсид-скаполитовых пород.

Все они в той или иной степени подверглись ударному метаморфизму, постепенно затухающему на глубине.

Разрез ВГС уникален. Во-первых, он вскрыл наиболее протяженную (4824 м) последовательность пород раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы (периферической части Волго-Уральского архейского кратона) [1, 9]. В то же время это разрез цокольного комплекса гигантской импактной структуры, сложенный породами, испытавшими ударный метаморфизм различных ступеней. Таким образом, изучение цирконов из пород разреза ВГС предоставляет возможность решать две задачи: датировать этапы эволюции раннедокембрийского фундамента и оценить устойчивость U-Pb изотопной системы цирконов при ударном метаморфизме.

По петрогеохимическим данным, резко преобладающие в разрезе ВГС гнейсы и амфиболиты – это бимодальная метаморфизованная ассоциация высокожелезистых базальтоидов и, вероятно, кислых вулканитов и терригенных пород, претерпевших два этапа метаморфизма в РТ условиях амфиболитовой фации. Значительный объем, особенно в нижней

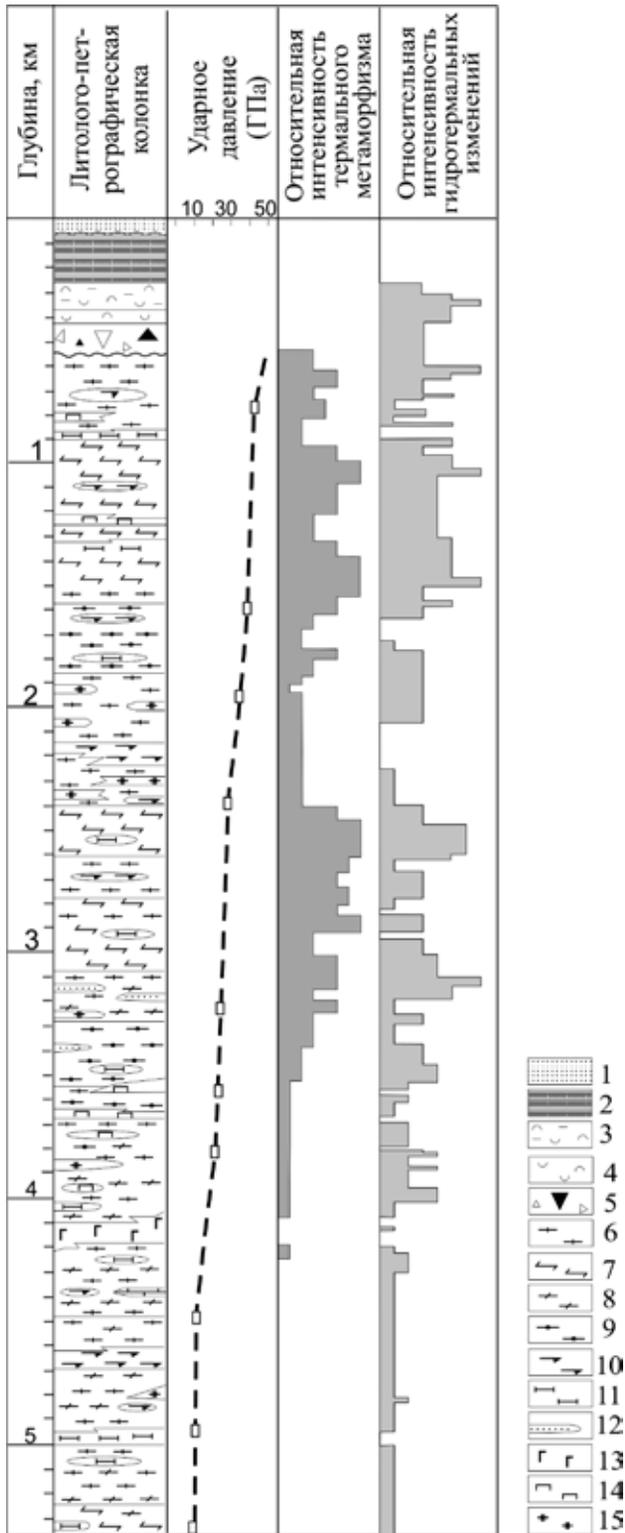


Рис. 1. Геологический разрез Воротиловской глубокой скважины [2]

1 – четвертичные отложения; 2 – глины ковернинской свиты средней юры; 3 – гравелиты узольской свиты средней юры; 4 – зювиты, 5 – полимиктовые аллогенные брекчии; 6–13 – метаморфические породы кристаллического фундамента: 6 – биотитовые гнейсы и плагиогнейсы, 7 – амфиболовые и биотит-амфиболовые плагиогнейсы, 8 – пироксен-амфиболовые и пироксен-биотит-амфиболовые плагиогнейсы, 9 – гранат-биотитовые и гранат-амфибол-биотитовые гнейсы, 10 – амфиболиты, 11 – кристаллические сланцы, 12 – кварцито-гнейсы, 13 – долериты; 14 – ультрамафиты; 15 – граниты

части разреза, занимают микроклиновые двуслюдяные граниты и гранито-гнейсы, отмечаются также тела ультрамафитов и долеритов.

Кристаллические породы испытали превращения, обусловленные прохождением ударной волны, дифференциальными движениями масс пород, инъекциями импактного расплава, термальным метаморфизмом, а также гидротермально-метасоматическими процессами. Величина ударного давления постепенно падает от 45–50 ГПа в прикровневой части центрального поднятия до 10–15 ГПа на глубине 5300 м (близ забоя ВГС). До глубины 3 км ударно-метаморфизованные породы испытали также термальное воздействие, температуры которого достигали 900–950 °С и существенно превышали оцениваемые по амплитудам ударного сжатия [5].

Хотя кристаллический фундамент в пределах Московской синеклизы вскрыт многими скважинами, достоверные изотопные датировки слагающих его пород отсутствуют. Получены лишь единичные Sm-Nd изохронные возрасты по образцам тагамита, биотит-гранатового гнейса и долерита из ВГС [2], причем анализ последнего не выявил изохронной зависимости. Проба гнейса дала изохронный Sm-Nd возраст 1802 ± 49 млн лет, а модельный возраст 2,65 млрд лет. Нами впервые получены представительные изотопно-геохронометрические данные для фундамента центральной части Восточно-Европейской платформы.

Методы аналитических исследований. В соответствии с поставленными задачами выбрана серия из 14 образцов весом 0,5–1 кг, охарактеризованных петрографически и геохимически. Из них выделены монофракции циркона для изучения на ионном микрозонде (SIMS).

Химический состав пород определен в ЦЛ ВСЕГЕИ по соответствующим методикам (<http://www.vsegei.ru/ru/structure/labanalytics/lab>). Петрогенные элементы, а также Ba, Cr, V определены рентгеноспектральным флуоресцентным методом (ARL-9800, аналитик Б. А. Цимошенко); Rb, Sr, Zr, Y, Pb, Nb – АРФ-6 (аналитик Л. А. Матвеева); Co, Ni, Cr, Cu, V, Sc, La, Yb – ICP-AES (OPTIMA-4300, аналитик Э. Г. Червякова); редкоземельные элементы – ICP-MS (ELAN-DRC-6100, аналитик В. А. Шишлов).

Аксессуарные цирконы исследовались по стандартной методике с использованием магнитной сепарации тяжелых жидкостей. Отобранные вручную зерна цирконов имплантировались в эпоксидную смолу вместе с зернами цирконовых стандартов TEMORA и 91500, а затем шлифовались и полировались приблизительно на половину своей толщины. Для выбора участков (точек) датирования на поверхности зерен использовались оптические (в проходящем и отраженном свете) и катодолюминесцентные изображения, отражающие внутреннюю структуру и зональность цирконов. U-Pb датирование цирконов осуществлялось на ионном микрозонде SHRIMP II в ЦИИ ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского. Всего измерены изотопные U-Pb отношения в 159 зернах циркона. Измерения U-Pb отношений проводились по методике, описанной в [12]. Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных ионов кислорода 4 нА, диаметр кратера 25–30 мкм. Обработка полученных данных осуществлялась с использованием программы SQUID. U-Pb отношения

нормализовались на значение 0,0668, приписанное к стандартному циркону TEMORA, что соответствует возрасту этого циркона 416,75 млн лет [8]. Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приведены на уровне 1σ , погрешности вычисленных конкордантных возрастов и пересечений с конкордией 2σ . Графики строились с использованием программы ISOPLOT/EX.

Петрографо-геохимическая характеристика исследуемых проб. Выбранные для изотопно-геохронологического исследования образцы представляют собой главные типы метаморфических и магматических пород кристаллического фундамента с различной степенью проявления ударного и последующего термального метаморфизма. Кроме того, изучена проба перекрывающих кристаллические породы зювитов, состоящих в основном из обломков наиболее интенсивно преобразованных

пород мишени (табл. 1). Все исследованные породы в той или иной степени затронуты процессами ударного метаморфизма, поэтому основное внимание уделялось образцам из самой нижней части вскрытого ВГС разреза (глубже 5300 м), где ударные преобразования минералов соответствуют относительно низким ступеням и выражены лишь ПДЭ одной системы в кварце. С другой стороны, изучены пробы интенсивно ударно- и термально-метаморфизованных пород (коптобластолитов) из скважин 14, 754, вскрывших наиболее поднятые части Воротиловского выступа.

Изученные пробы представляют собой гнейсы и плагиогнейсы различного состава, амфиболиты, граниты, а также долериты, в виде даек прорывающие гнейсовые толщи в интервале 4099–4220 м. Результаты химического анализа образцов из разреза ВГС приведены в табл. 2. По этим данным, а также по кривым распределения РЗЭ (рис. 2)

Таблица 1

Краткая петрографическая характеристика образцов ударно-метаморфизованных пород

Номер пробы	Скважина	Глубина, м	Порода	Циркон в породе	Оценка ударного давления, ГПа
5327	ВГС	5327,0	Амфиболовый плагиогнейс с заметным развитием кальцита, эпидота, хлорита	Зерна до 0,03 мм в амфиболе	10–15
15007	ВГС	5325,9	Плагиоамфиболит	Зерна до 0,08 мм в амфиболе, реже в плагиоклазе	10–15
5324	ВГС	5324,0	Мезократовый амфиболовый плагиогнейс с жилой плагиогранита	Зерна до 0,04 мм в амфиболе, редко в кварце	10–15
14979	ВГС	5308,7	Мезократовый гранат-биотит-амфиболовый плагиогнейс	Зерна до 0,03 мм в амфиболе, реже в кварце и плагиоклазе	10–15
5204	ВГС	5204,0	Лейкократовый микроклинизированный биотитовый гнейс	Зерна 0,01–0,03 мм в кварце и полевых шпатах	15–20
13023	ВГС	4184,5	Габбродолерит		5–10
12602	ВГС	4099,4	Долерит миндалекаменный		5–10
3875	ВГС	3875,5	Двуслюдяной микроклиновый гранит	Обильные, сравнительно крупные зерна (до $0,7 \times 0,13$ мм) с ореолами распада в микроклине, реже в плагиоклазе и эпидоте	20–25
3851	ВГС	3851,0	Ударно- и термально-метаморфизованный лейкократовый биотит-амфиболовый гнейс с титанитом	Зерна до $0,06 \times 0,22$ мм в рекристаллизованном маскелините, биотите, но особенно часто в амфиболе (в последнем – мелкие до 0,03 мм)	20–25
3524	ВГС	3524,0	Термально-метаморфизованный биотит-амфиболовый плагиогнейс с вкрапленностью сульфидов		20–25
1859	ВГС	1859,0	Катаклазированный ударно- и термально-метаморфизованный лейкократовый биотитовый гнейс	Зерна до 0,03 мм в измененном маскелините и диаплектовом кварце	30–35
754403	754	403,1	Интенсивно ударно- и термально-метаморфизованный гранат-амфиболовый плагиогнейс с преобладанием перекристаллизованного и замещаемого цеолитами маскелинита	Зерна до 0,03 мм в агрегате перекристаллизации маскелинита	30–35
14260	14	260,0	Интенсивно ударно- и термально-метаморфизованный амфиболовый гнейс. Все породообразующие минералы изотропизированы и рекристаллизованы	Зерна до 0,16 мм в микрогранобластовом агрегате калишпата, замещающего маскелинит	35–45
38478	38	478,0	Зювит витролитогранокластический, с преобладанием кластов аргиллитов, алевролитов и ударно-метаморфизованных гнейсов	Редкие зерна до 0,035 мм в цементирующей массе	

Химический состав образцов ударно-метаморфизованных пород разреза ВГС

Порода	Амфиболит	Плагиогнейсы				Гранитизированные гнейсы и граниты				Долериты	
		15007	5327	5324	14979	3524	3851	5204	3875	1859	12602
SiO ₂ , мас.%	46,60	62,30	62,90	59,40	56,16	58,30	74,80	72,70	68,60	49,10	49,70
TiO ₂	1,37	0,72	0,48	0,57	1,47	0,58	0,47	0,19	0,45	1,29	1,24
Al ₂ O ₃	14,10	15,30	15,40	15,50	14,73	20,20	11,60	13,90	15,30	14,50	13,80
Fe ₂ O ₃	4,35	1,70	1,30	1,94	2,08	1,31	0,99	0,71	1,49	3,00	2,81
FeO	9,30	4,24	3,50	4,32	7,02	3,35	2,38	0,89	1,19	7,89	7,89
MnO	0,23	0,12	0,09	0,11	0,00	0,07	0,04	0,03	0,04	0,18	0,17
MgO	7,73	3,32	3,63	5,19	3,18	1,56	1,30	0,71	1,11	7,82	8,17
CaO	10,30	5,65	6,22	7,07	5,45	6,02	2,16	1,84	2,73	11,60	11,60
Na ₂ O	2,18	3,92	3,60	3,29	3,00	4,29	2,45	3,61	4,33	1,42	1,50
K ₂ O	1,23	0,96	1,24	0,93	1,31	1,52	2,60	3,79	3,06	0,57	0,56
P ₂ O ₅	0,15	0,07	0,07	0,07	0,56	0,16	0,09	0,02	0,16	0,09	0,09
п.п.п.	1,34	1,13	1,02	0,92	5,07	2,20	0,74	1,20	1,06	1,74	1,46
Сумма	98,88	99,43	99,45	99,31	100,03	99,56	99,62	99,59	99,52	99,20	98,99
V, ppm	260	145	117	120	97,8	84,2	43,7	22,1	40,5	230	220
Cr	67,0	60,3	185	270	23,3	17,0	49,8	24,2	23,2	280	280
Co	52,4	26,3	23,2	23,6	32,2	16,2	9,41	5,53	10,3	47,5	47,2
Cu	80,8	65,5	64,1	13,2	32,1	14,8	8,19	46,4	2,78	99,8	99,3
Ni	66,1	41,8	72,5	70,0	8,63	5,86	17,4	8,83	10,8	79,7	83,0
Zn	92,5	63,3	55,8	48,6	81,2	65,2	48,0	16,4	59,3	65,7	67,0
Sr	240	435	684	347	279	945	506	556	807	259	264
Y	21,8	9,8	10,2	9,23	20,3	10,3	9,3	2,0	6,6	22,2	21,4
Zr	65,1	78,6	82,9	78,7	132	200	191	124	180	99,6	81,7
Nb	6,77	8,17	6,58	4,81	16,9	6,39	10,7	7,63	15,0	6,06	5,41
La	5,96	8,26	8,97	7,91	27,4	13,7	33,9	17,9	49,1	8,07	7,28
Eu	1,14	0,95	0,81	0,59	1,49	0,93	1,13	0,83	1,37	0,99	0,91
Yb	1,78	1,03	1,02	0,85	2,52	1,19	0,82	0,28	0,51	2,03	1,75
Ba	371	368	770	249	Не обн.	786	1120	2220	1470	130	140
Pb	9,24	8,51	19,2	0,63	Не обн.	5,6	15,5	16,0	8,86	2,45	2,19
Rb	15,9	18,8	28,9	16,8	Не обн.	41,7	75,4	81,0	76,1	15,2	15,9
Hf	1,68	Не обн.	Не обн.	1,88	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	2,40	1,88

выделяются (помимо долеритов) лейкократовые гнейсы, характеризующиеся дифференцированным спектром распределения РЗЭ (LREE/HREE > 100) и слабовыраженной отрицательной Eu-аномалией, и мезократовые плагиогнейсы, у которых LREE/HREE = 25–50 и проявлена положительная Eu-аномалия. Образец 3851 лейкократового биотит-амфиболового гнейса занимает промежуточное положение между этими двумя группами. От упомянутых гнейсов особо отличается плагиоминоклиновый гранит (обр. 3875) с резко дифференцированным спектром РЗЭ и четкой положительной Eu-аномалией, что является характерным признаком гранитоидов разреза ВГС.

Несмотря на существенное литологическое и петрохимическое разнообразие выбранных образцов, содержания Zr в них (включая долериты) достаточно близки, от 70 до 200 ppm (табл. 2).

Циркон наблюдается в виде мелких (не более 0,25 мм длиной) эллипсоидальных зерен в шлифах из всех изученных пород, за исключением долеритов, в которых он, очевидно, весьма редок. В слабо ударно-метаморфизованных породах с глубин более 5300 м разреза ВГС зерна циркона приурочены преимущественно к роговой обманке (рис. 3, А), тогда как в более интенсивных ударно- и термально-преобразованных породах выше по разрезу – ко вторичным сферолитовым или микрогранобластовым агрегатам калиевого полевого шпата с примесями сапонита и цеолитов по диаплектовому плагиоклазу или маскелиниту (рис. 3, Б, Г), иногда к кварцу.

Морфология и геохимия циркона. Все пробы отличаются разнообразием морфологических типов зерен циркона (рис. 4): присутствуют зерна со сглаженными ребрами эллипсоидальной (вплоть до

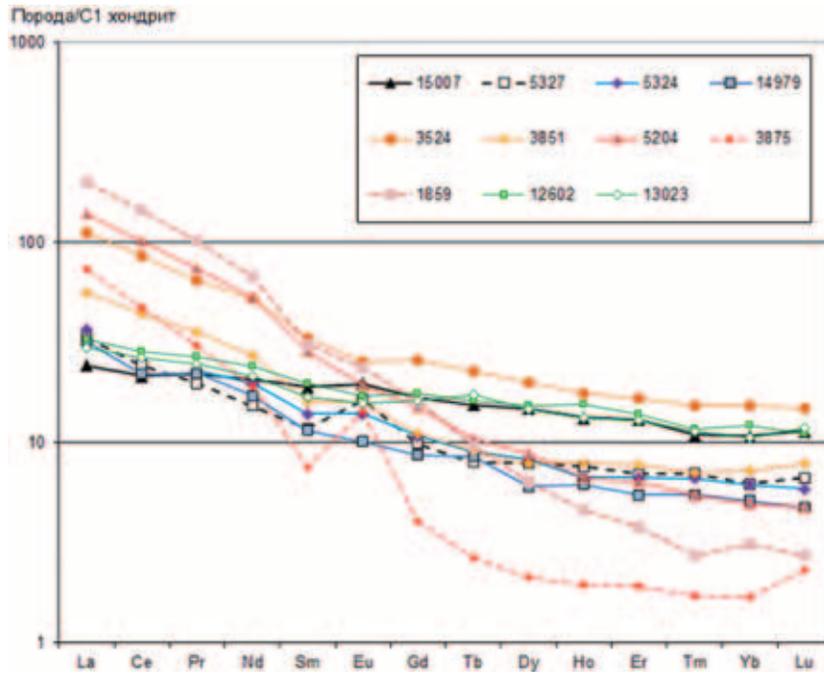


Рис. 2. Кривые распределения (нормированные по С1 хондриту) РЗЭ в породах разреза ВГС, отобранных для геохронологического исследования

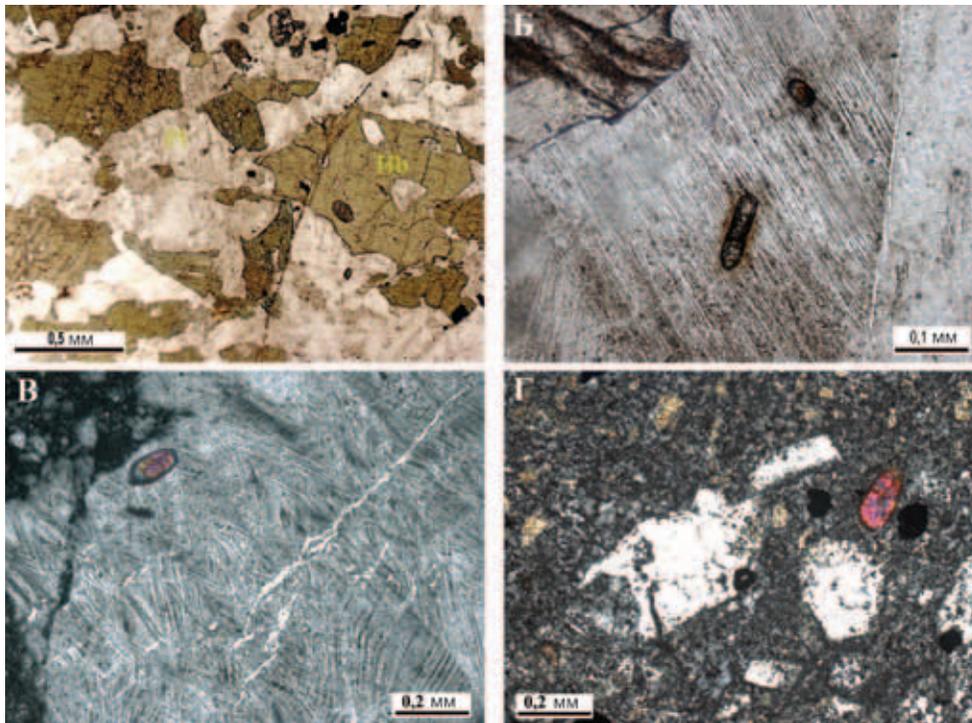


Рис. 3. Циркон в ударно-метаморфизованных породах разреза ВГС (микрофотографии шлифов; А, Б – без анализатора, В, Г – николи X)

А – амфиболовый плаггиогнейс (обр. 5327) с эллипсоидальным включением циркона в роговой обманке; Б – цирконы двух различных морфотипов (длиннопризматический и эллипсоидальный) в диаплектовом плаггиоклазе (обр. 3851); в левом верхнем углу – биотит с полосами смятия; В – короткопризматический кристалл циркона в микроклине с двумя системами ПДЭ из гранита (обр. 3875); Г – эллипсоидальное зерно циркона в микрзернистом полевошпатовом агрегате, замещающем маскелинит (обр. 14260). Светлое – диаплектовый кварц шариковой (ballen) структуры

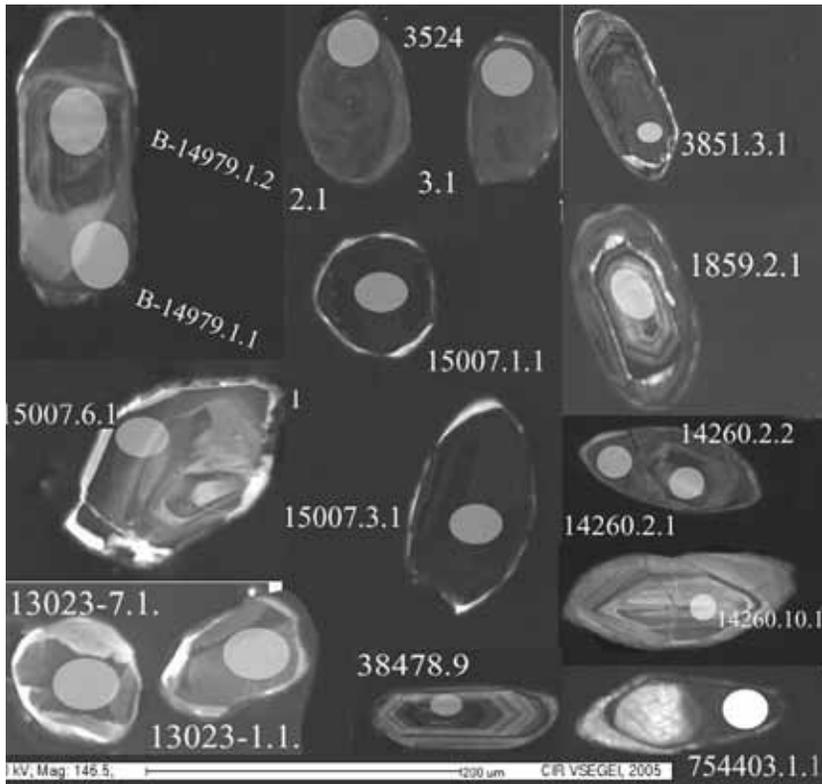


Рис. 4. Катодолюминесцентные снимки отдельных зерен циркона, выбранных для изотопного датирования. Снимки демонстрируют типичную морфологию цирконов изученных пород. Пояснения в тексте. Цифры на фото – участки датирования

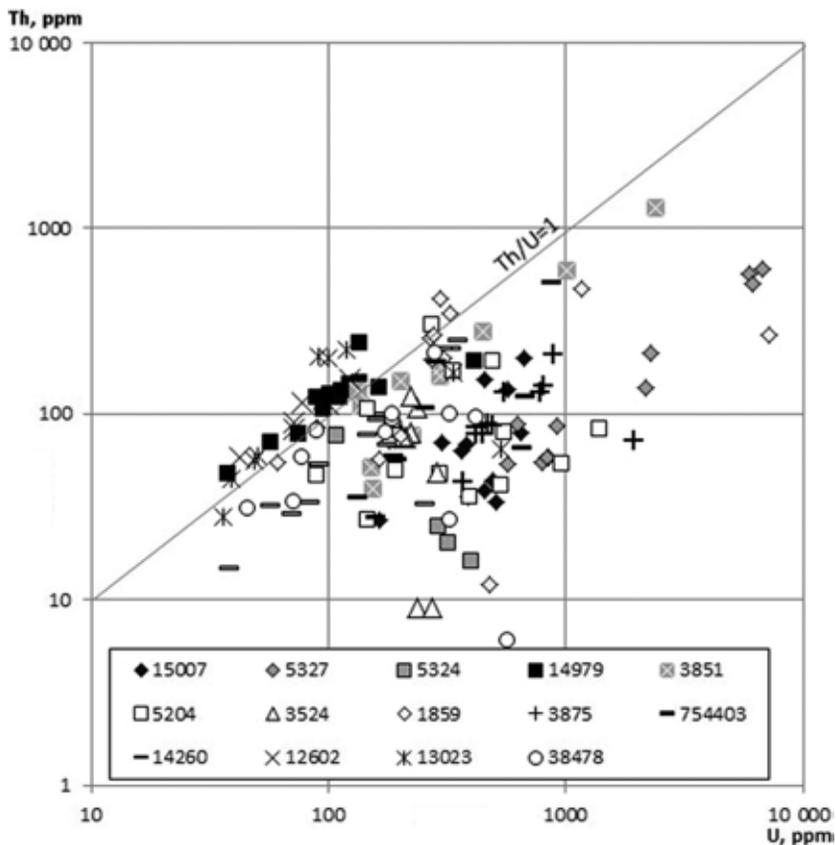


Рис. 5. Содержание U и Th в цирконах из пород кристаллического фундамента Воротиловского выступа

изометричной) формы; субидиоморфные—идиоморфные призматические кристаллы цирконового типа, часто с осциляционной зональностью; трещиноватые обломки. Поскольку значительная часть зерен характеризуется гетерогенным внутренним строением, строгая типизация кристалломофологических групп циркона вряд ли может быть проведена. Однако эта проблема не представляется существенной с точки зрения задачи исследования, так как корреляция между морфологией зерен и геохимическими и изотопными характеристиками циркона отсутствует. В силу этого для изотопно-геохронологического исследования использовались, как правило, центральные, более гомогенные участки зерен.

Отсутствие четко выраженных типоморфных признаков и многообразие морфологических особенностей характерно для циркона, кристаллизующегося в условиях метаморфизма амфиболитовой фации, в том числе за счет рекристаллизации ранее существовавшего циркона [10]; в то же время характерная для второго типа осциляционная зональность указывает скорее на магматический генезис кристаллов.

Нахождение эллипсоидальных цирконов с удлинением < 2 в долеритах указывает на их ксеногенное происхождение; для собственных цирконов долеритов (их пегматоидных разностей) характерны длиннопризматические зерна, часто без пирамидальных окончаний [7].

Содержания Th и U, а также Th/U отношение в цирконах варьируют в широких пределах (рис. 5). Для цирконов плаггиогнейсов и долеритов характерна прямая корреляция между содержаниями урана и тория, в отличие от цирконов лейкократовых пород. Цирконы отдельных образцов, близких литологически и геохимически (14979 и 5324), могут существенно различаться по содержанию урана. Значительное преобладание цирконов с низким Th/U отношением указывает на формирование минерала из расплавов высокой степени фракционирования.

Th/U отношение в цирконах от 0,01 до 2,29. Полимодальное распределение его значений (рис. 6) позволяет предполагать присутствие по крайней мере трех совокупностей, различных по этому параметру, хотя и частично перекрывающихся: цирконы с резким преобладанием U над Th ($\text{Th}/\text{U} < 0,35$); с некоторым преобладанием урана (0,35–0,85); обедненные U относительно Th ($\text{Th}/\text{U} > 1,0$). Как будет показано ниже, выделение этих трех групп имеет генетический смысл.

Изотопное датирование цирконов. Результаты U–Pb датирования цирконов показали, что почти во всех пробах наблюдается значительный разброс отношений радиогенного свинца, однако в подавляющем большинстве случаев полученные значения ложатся на дискордии. Кроме того, для цирконов отдельных проб получены конкордантные возрасты, совпадающие как между собой, так и с верхними пересечениями дискордий.

По результатам изотопно-геохронологического исследования могут быть выделены три группы цирконов (рис. 7), причем каждая из групп включает зерна всех трех морфологических типов.

1. Цирконы с рассчитанными значениями $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраста 2492–2556 млн лет и низкой (1–3%) дискордантностью возрастов. Они составляют

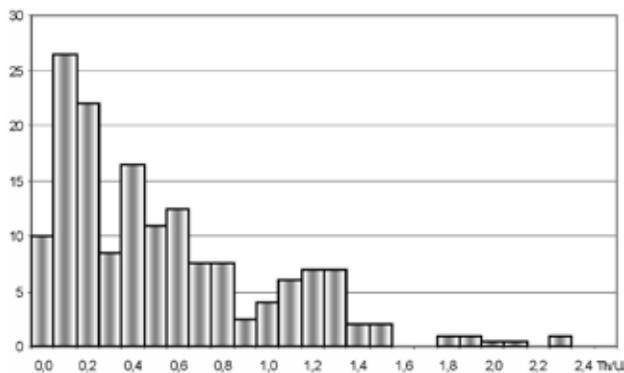


Рис. 6. Гистограмма значений Th/U отношения в цирконах из пород кристаллического фундамента Воротиловского выступа

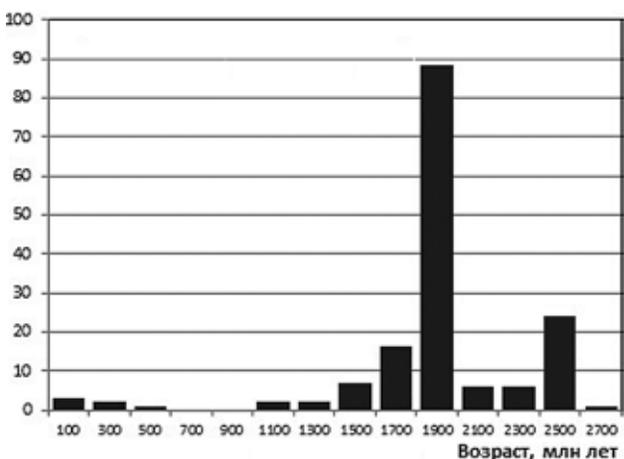
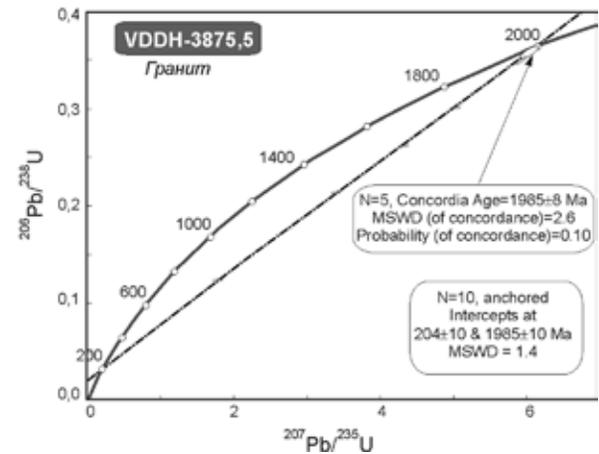
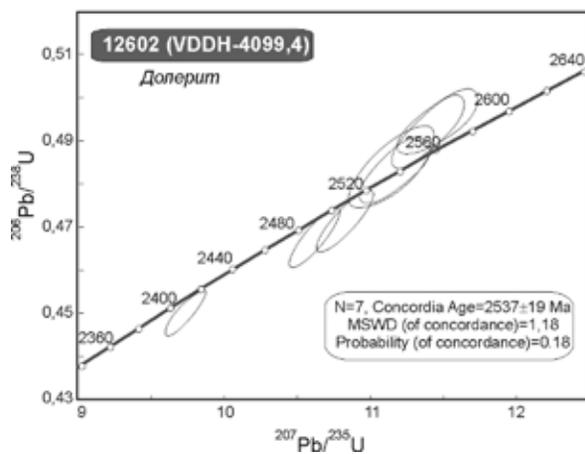
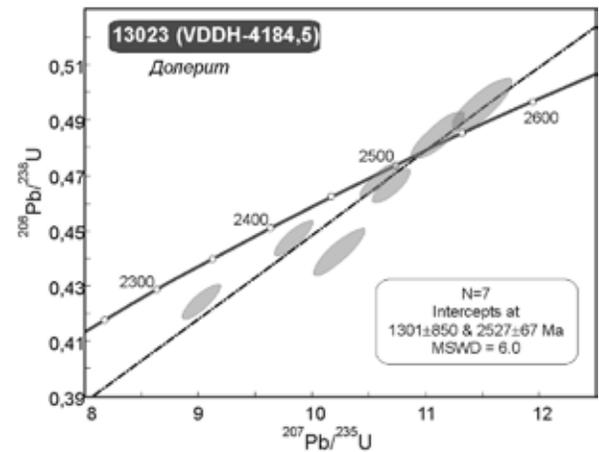
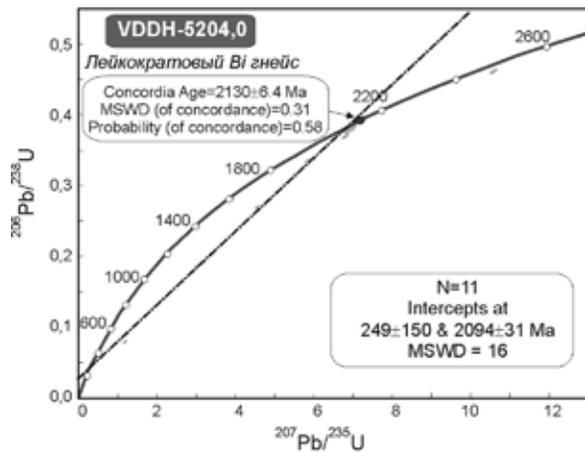
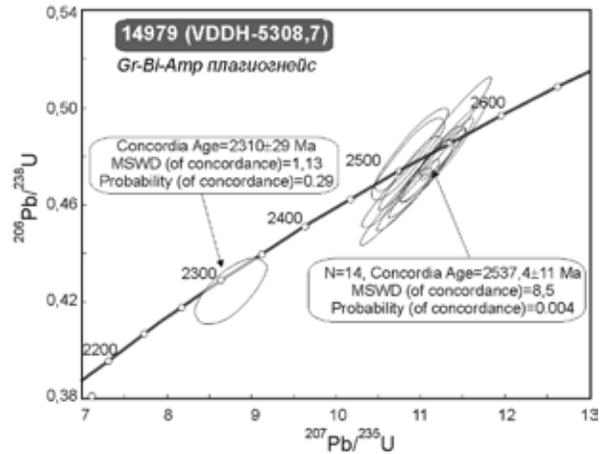
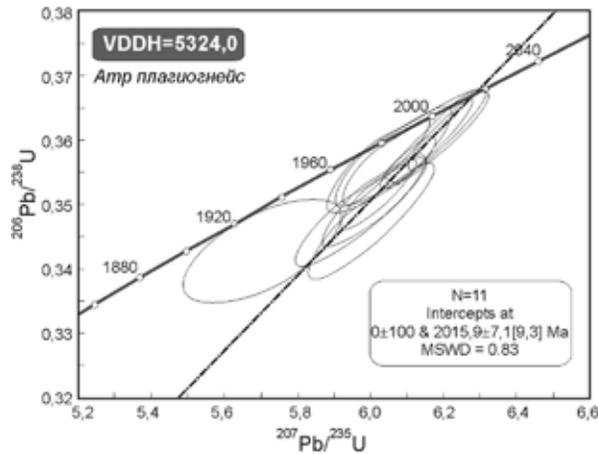
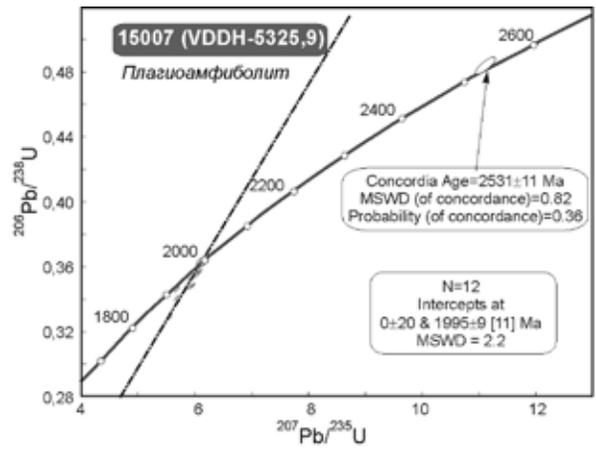
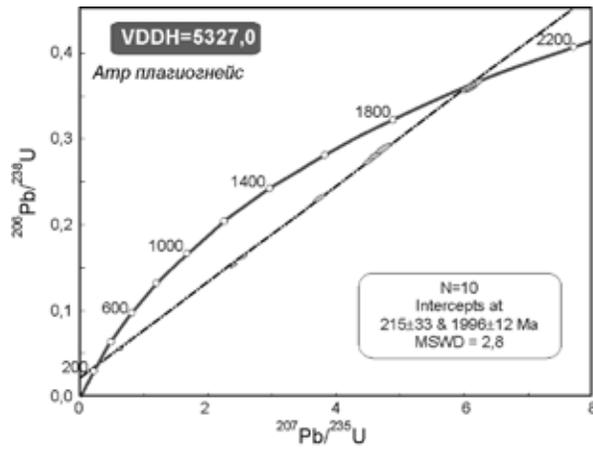


Рис. 7. Гистограмма $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастов (древнее 1,0 млрд лет) и точек нижних пересечений дискордий (менее 1,0 млрд лет) проанализированных цирконов

популяцию цирконов в одной из проб плаггиогнейса (14979) и резко доминируют в обеих пробах долеритов (ксеногенные зёрна); единичные зерна этого возраста имеются в амфиболите (15007) и лейкократовом гнейсе (5204). Цирконы этой группы характеризуются пониженными содержаниями U (134 ppm в среднем), повышенными Th (125 ppm), а также выдержанным высоким Th/U отношением (в среднем 1,18), характерным для цирконов из магматических пород среднего и основного состава [3].

2. Цирконы с рассчитанными значениями $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраста 1945–2025 млн лет и относительно низкой (< 10 , обычно 1–4%) дискордантностью возрастов. Они составляют 45% изученной совокупности и преобладают в большинстве проб, включая зювит. Содержание урана, по сравнению с первой группой, в среднем более высокое (338 ppm), тория – пониженное (76 ppm); Th/U отношение, хотя и варьирует в очень широких пределах (от 0,01 до 0,83), всегда меньше 1 (в среднем 0,30).

3. Цирконы с высокой дискордантностью возрастов. Они составляют 33% изученной совокупности и принадлежат главным образом к интенсивно ударно-метаморфизованным породам; в пробе 14260 сюда относятся все измеренные зерна. Вместе с тем, отдельные цирконы из слабо ударно-преобразованных плаггиогнейсов (5327) также попадают в данную группу, но они характеризуются



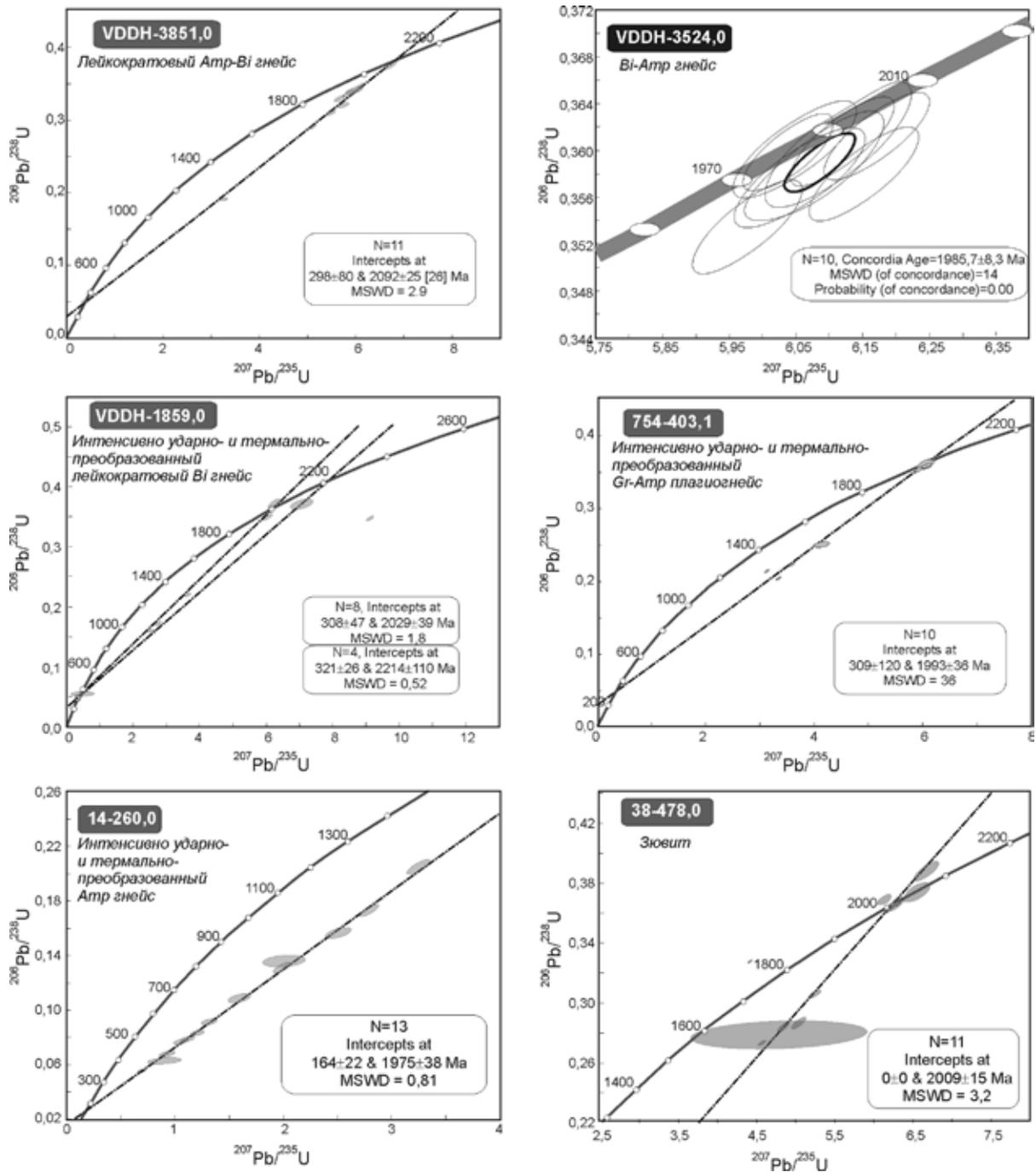


Рис. 8. Диаграммы $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ с конкордией проб цирконов из пород Воротилковского выступа

резко повышенными содержаниями урана и тория. Практически все цирконы с высоким (> 800 ppm) содержанием урана находятся в этой группе. Th/U отношение от 0,03 до 1,09, в среднем 0,44. По этому параметру цирконы второй и третьей групп близки, хотя в среднем последние обогащены как ураном, так и торием. Наиболее вероятно, что дискордантность обусловлена метамиктизацией обогащённых U цирконов и потерями Pb.

Диаграммы $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ с конкордией для всех проб приведены на рис. 8. Они фиксируют два основных возрастных рубежа в формировании пород кристаллического фундамента Воротилковского выступа.

1. Цирконы из пробы мезократового гранат-амфибол-биотитового плагиогнейса (14979) и долерита (12602, ксеногенный циркон) показали конкордантный возраст в 2537 ± 11 и 2537 ± 19 млн лет. Близкое значение (2531 ± 11 млн лет) установлено и для единичного зерна из амфиболита (пр. 15007/6.1). Кроме того, для цирконов из второй пробы долерита (13023) получена дискордия, верхнее пересечение которой соответствует возрасту 2527 ± 67 млн лет.

Анализ одного из зерен циркона из лейкократового гнейса (5204) ложится на конкордию в точке, соответствующей возрасту 2130 ± 6 млн лет. Ввиду единственности этого определения нет смысла

привязывать его к какому-либо геологическому событию.

2. Большинство проб характеризуется дискордиями, верхнее пересечение которых отвечает значениям возраста 1975–2094 млн лет. Цирконы из плагиогнейса (пр. 3524) показывают конкордантный возраст 1988 ± 8 млн лет; аналогичное значение 1985 ± 8 млн лет получено и для циркона из гранита (пр. 3875). Близкие дискордантные значения определяются в цирконах из проб в различной степени ударно-метаморфизованных гнейсов 5327, 15007, 754403 и 14260; две последние пробы отличаются высокой дискордантностью возрастов. В то же время для плагиогнейса пр. 5324 верхнее пересечение дискордии соответствует значению 2016 ± 7 млн лет, а для лейкократовых гнейсов 3851 и 5204 – 2092–2094 млн лет. Возможно, эти значения указывают на отдельные возрастные генерации цирконов.

Нижние пересечения дискордии соответствуют датировкам от 0 до 308 млн лет, но отличаются столь высокими погрешностями, что какая-либо относительно точная датировка не может быть принята. Следует лишь отметить, что для пробы из наиболее интенсивно ударно-метаморфизованной породы (14260), в которой все цирконы характеризуются существенной потерей радиогенного свинца, нижнее пересечение отвечает значению 164 ± 22 млн лет, соответствующему времени импактного события по стратиграфическим данным [2].

Обсуждение результатов. Изотопное датирование пород кристаллического фундамента. По результатам изотопно-геохронологического исследования в породах кристаллического фундамента Воротиловского выступа выделяются две возрастные группы цирконов, фиксирующие два основных этапа становления этих пород (рис. 9), приводивших к изменению U-Pb системы цирконов.

Время кристаллизации цирконов с низким содержанием урана, высоким Th/U отношением и возрастом 2531–2537 млн лет отвечает формированию магматического тоналитового протолита гнейсов, преобразованного в условиях амфиболитовой фации. Последнее следует как из петрографических данных, так и морфологии циркона, характеризующейся отсутствием четко выраженных типоморфных признаков и многообразием морфологических особенностей. Однако некоторые зерна циркона этого возраста выделяются дипирамидально-призматическими формами с осцилляционной зональностью роста. Такие цирконы определенно кристаллизовались из расплава. Рассматриваемые цирконы находятся в породах наиболее глубокой (ниже 5300 м) вскрытой части разреза ВГС, отличающихся положительной европиевой аномалией. Аналогичные цирконы, вероятно, ксеногенного происхождения, находятся в долеритах, прорывающих гнейсы фундамента.

Основная масса цирконов в различных породах (гнейсах, плагиогнейсах, амфиболитах, гранитах) сформировалась при мигматизации и внедрении плагиомикроклиновых гранитов. Пик этих процессов приходится примерно на 1980–1990 млн лет. Одновременно фиксируются датировки около 2016–2021 и, возможно, 2092–2094 и 2130 млн лет (в семи пробах из 14). Они отражают либо отдельные импульсы, либо длительное проявление процессов анатексиса и гранитообразования, отвечающих палеопротерозойскому диастрофизму, либо влияние реликтовых изотопных систем более древних цирконов.

В большинстве проб отмечается воздействие на изотопную систему цирконов наложенного термального события, возраст которого по нижним пересечениям дискордий не превышает 308 млн лет. Очевидно, таким событием является формирование Пучеж-Катунской астроблемы, которое датирует-

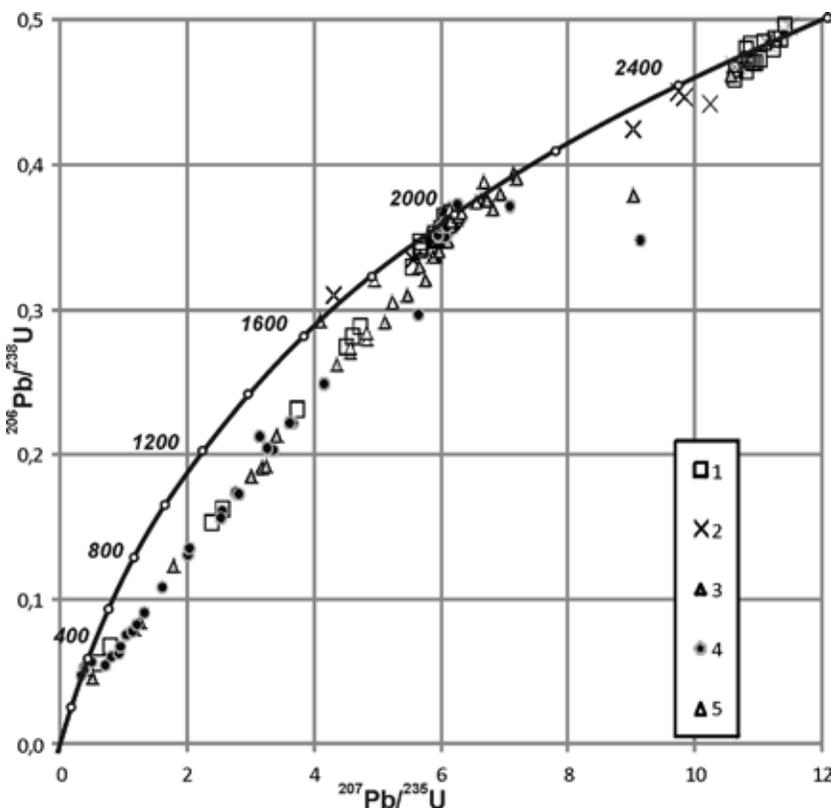


Рис. 9. Сводная $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ диаграмма для всех исследованных цирконов из пород Воротиловского выступа
 1 — слабо ударно-метаморфизованные плагиогнейсы и амфиболиты с глубин ниже 5300 м; 2 — долериты; 3 — умеренно ударно-метаморфизованные гнейсы и граниты с глубин 3000–5250 м; 4 — интенсивно ударно-метаморфизованные гнейсы из прикровлевой части аутигенной брекчии и 5 — зювита

ся по палеогеографическим и стратиграфическим данным средней юрой.

Полученные изотопно-геохронологические данные позволяют отнести амфиболит-гнейсовую толщу кристаллического фундамента, вскрытую ВГС, к архею. Примечательно, что реликтовых гранулитовых ассоциаций не выявлено, как и при петрографическом изучении разреза ВГС. В то же время внедрение плагиомиоклиновых гранитов и мигматизация относятся к раннему протерозою.

Выявленные геохронологические рубежи в основном согласуются с главными стадиями тектоно-магматической активности в пределах Волго-Уральского сегмента Восточно-Европейского кратона, хотя тоналит-трондьемит-гранодиоритовые комплексы возраста 2530 млн лет, как и в пределах Кольско-Карельского архейского блока, там пока не известны. Однако в отличие от последнего, широкое проявление метаморфизма и мигматизации около 2000 млн лет – характерная черта Волго-Уралии. Многочисленные датировки Тараташского комплекса на Южном Урале [14], единственного выхода кристаллического фундамента Волго-Уралии на поверхность, только подтверждают эту закономерность.

Полученные данные еще раз подчеркивают своеобразие раннедокембрийской эволюции Волго-Уралии, не сопоставимой с таковой в Фенно-скандском сегменте Восточно-Европейского кратона, и их раздельное развитие до конца палеопротерозоя [9].

Воздействие ударного метаморфизма на изотопную систему цирконов. Все исследованные пробы относятся к породам, подвергшимся ударному метаморфизму различных ступеней. Сами зерна циркона даже в наиболее преобразованных гнейсах большей частью не несут однозначных следов ударного воздействия; возможно, это связано с послееударным термальным воздействием. Некоторые зерна из пород низких ступеней ударного метаморфизма трещиноваты (главным образом в долеритах). В пробах витрифицированных плагиогнейсов (14260 и 754403), а также в зювите в отдельных зернах наблюдаются системы тонких трещин (рис. 10), по морфологии близкие к планарным деформационным элементам (ПДЭ), характерным для ударно-метаморфизованных цирконов [10, 15]. Такие ПДЭ являются индикаторами ударного сжатия более 20 ГПа [15].

Для большей части (не менее 2/3) цирконов не отмечается существенной потери радиогенного

свинца, так что возможность определения возраста пород мишени полностью сохранилась. Для 1/3 цирконов наблюдается некоторая потеря радиогенного свинца. К ним относятся как цирконы из интенсивно (> 30–35 ГПа) ударно-метаморфизованных гнейсов, так и зерна из менее измененных пород (из проб 5327, 5204, 3875), но содержащие высокие концентрации урана и тория. Наблюдается прямая корреляция между содержанием урана в цирконе и рассчитанным $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возрастом, а также степенью дискордантности возрастов. Импактное «омоложение» имеет место предпочтительно для обогащенных ураном и торием и, следовательно, более метамиктных цирконов. Тем не менее, даже в них не происходит полного «стирания» изотопно-геохимической информации, подтверждая известные экспериментальные и эмпирические данные [11, 13]. Такая же картина характеризует и зерна со следами планарных деформаций (рис. 10): для всех из них измерены значения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраста в 1880–2032 млн лет, характеризующиеся различной степенью дискордантности; циркон с наиболее выраженными ПДЭ из пр. 754403 и вовсе показал близконкордантные значения $^{206}\text{Pb}/^{258}\text{U}$ (1972 ± 14), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (2006 ± 15) и $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ (1982 ± 47) возрастов. Следовательно, использование циркона из ударно-метаморфизованных пород для датирования импактных событий требует более детального изучения внутреннего строения зерен с целью выделения фаз, возникших в результате ударной и послееударной перекристаллизации минерала. К таким фазам могут относиться как высокобарические фазы, возникающие в деформационных микрizonaх при ударном сжатии минерала, так и внешние зоны перекристаллизации, связанные с послееударным термальным метаморфизмом, широко проявленным в породах центрального поднятия Пучеж-Катунской астроблемы.

Выводы. Впервые проведено детальное U-Pb (SIMS) датирование цирконов из пород кристаллического фундамента центральной части Восточно-Европейской платформы.

Выделены лишь два основных этапа эволюции кристаллических пород Воротиловского выступа, отразившиеся в росте и/или изменении цирконов: 2540–2530 млн лет – формирование амфиболит-гнейсовой толщи в условиях амфиболитовой фации, отвечающее границе архея и протерозоя; 2020–1980 млн лет – анатексис и гранитизация

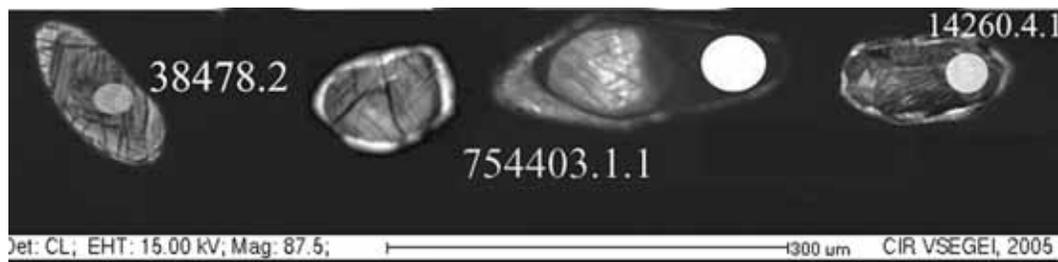


Рис. 10. Плоскостные деформации в отдельных зернах циркона из высоко ударно-метаморфизованных пород (катодолюминесцентные снимки)

Такие зерна составляют не более 10% популяций циркона в пробах. На снимке указаны участки (точки) датирования. Два зерна из проб 38478 и 754403 показывают системы неправильных трещин; два зерна из проб 754403 и 14260 – системы тонких планарных трещин, напоминающих ПДЭ [10]. Значения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраста составляют (млн лет; в скобках – дискордантность) 38478.2 – 1976 (27); 754403.1.1 – 2006 (2); 14260.4.1 – 1881 (36)

неоархейского субстрата, проявившиеся, вероятно, в виде нескольких дискретных импульсов. Оба этапа соответствуют глобальным эпохам тектоно-термальной активности (беломорской и раннекарельской). Юрское импактное событие привело лишь к частичным нарушениям изотопно-геохимической системы ранних цирконов.

Нахождение в долеритах исключительно цирконов с возрастом около 2530 млн лет косвенно указывает на относительно древний (> 2000 млн лет) возраст этих пород, который по аналогии с дайками центральной части Волго-Уральского мегаблока [4], считался рифейским. С другой стороны, возрасты захваченных цирконов в долеритах могут указывать на исключительно архейский спектр вмещающих долериты пород.

Ударный метаморфизм ниже II ступени ($P < 35$ ГПа) не приводит к существенным изменениям изотопной системы цирконов (за исключением обогащенных ураном метамиктных разновидностей), так что возможность изотопного датирования пород мишени полностью сохраняется.

При высоких (III–IV) степенях ударного метаморфизма имеет место существенная потеря радиогенного свинца, что приводит к дискордантности возрастов, однако полного «стирания» начальной изотопной информации не происходит. Для датирования импактного события по циркону из ударно-метаморфизованных пород, очевидно, необходимы детальное изучение внутреннего строения зерен и выделение фаз, возникших при ударной и послеударной перекристаллизации минерала.

Авторы весьма признательны зав. сектором ЦИИ ВСЕГЕИ Н. Г. Бережной за важные и полезные замечания и исправления, существенно улучшившие статью.

1. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю I-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. Т. 2 / М.В. Минц, А.К. Сулейманов, П.С. Бабаянц и др. — М.: ГЕОЛКАРТ, ГЕОС, 2010. — 433 с.

2. Глубокое бурение в Пучеж-Катунской импактной структуре / ред. В.Л. Масайтис, Л.А. Певзнер. — СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. — 392 с.

3. Каулина Т.В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. — Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2010. — 144 с.

4. Кристаллический фундамент Татарстана и проблемы его нефтегазоносности / ред. Р.Х. Муслимов, Т.А. Лапинская. — Казань: Дельта, 1996. — 488 с.

5. Масайтис В.Л., Мащак М.С. Перекристаллизация и бластез ударно-метаморфизованных пород в импактных структурах // Записки ВМО. 1996. Ч. 125. № 1. — С. 1–18.

6. Масайтис В.Л., Мащак М.С., Наумов М.В. Пучеж-Катунская астроблема: модель строения гигантского импактного кратера // *Астрономический вестник*. 1996. Т. 30. № 1. — С. 5–13.

7. Степанова А.В., Самсонов А.В., Ларионов А.Н. Заключительный эпизод магматизма среднего палеопротерозоя в Онежской структуре: данные по долеритам Заонежья // *Труды КарНЦ РАН*. 2014. № 1. — С. 3–16.

8. Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M. et al. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology // *Chemical Geol.* 2003. Vol. 200. — P. 155–170.

9. Bogdanova S., Gorbatshev R., Garetsky R.G. EUROPE: East European Craton / *Encyclopedia of Geology*. Elsevier, 2005. Vol. 2. — P. 34–49.

10. Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.W.O., Kinny P.D. Atlas of zircon textures // *Rev. in Mineralogy and Geochem.* 2003. Vol. 53. — P. 469–500.

11. Deutsch A., Schärer U. Isotope systematics and shock-wave metamorphism: I. U-Pb in zircon, titanite and monazite, shocked experimentally up to 59 GPa // *Geochimica et Cosmochim. Acta*. 1990. Vol. 54. N 12. — P. 3427–3434.

12. Larionov A.N., Andreichev V.A., Gee D.G. The Vendian alkaline igneous suite of Northern Timan: ion microprobe U-Pb zircon ages of gabbro and syenite / *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. Geological Society Memoirs. London, 2004. Vol. 30. — P. 69–74.

13. Pidgeon R.T., Nemchin A.A., Kamo S.L. Comparison of structures in zircons from lunar and terrestrial impactites // *Canadian J. of Earth Sci.* 2011. Vol. 48. N 2. — P. 107–116.

14. Proterozoic magmatic and tectonometamorphic evolution of the Taratash complex, Central Urals, Russia / S. Sindern, R. Hetzel, B.A. Schulte, U. Kramm, Y.L. Ronkin, A.V. Maslov, O.P. Lepikhina // *Intern. J. of Earth Sci.* 2005. Vol. 94. — P. 319–335.

15. Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R.T., Stöffler D. Shock-metamorphosed zircon in terrestrial impact craters // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2006. Vol. 41. N 3. — P. 433–454.

Наумов Михаил Виленович — канд. геол.-минер. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Mikhail_Naumov@vsegei.ru>.

Ларионов Александр Николаевич — канд. геол.-минер. наук, ст. науч. сотрудник, ЦИИ ВСЕГЕИ.

<Alexander_Larionov@vsegei.ru>.

Масайтис Виктор Львович — доктор геол.-минер. наук, гл. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Victor_Masaitis@vsegei.ru>.

Мащак Михаил Степанович — канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Mikhail_Mashchak@vsegei.ru>.

Богданова Светлана Вениаминовна — Lund University, Sweden Dept. of Geology, senior lecturer emeritus.

<svetlana.bogdanova@geol.lu.se>.

Пресняков Сергей Леонидович — ст. науч. сотрудник, ЦИИ ВСЕГЕИ. <Sergey_Presnyakov@vsegei.ru>.

Лепехина Елена Николаевна — науч. сотрудник, ЦИИ ВСЕГЕИ. <Elena_Lepikhina@vsegei.ru>.