

УДК 550.93

## Th–U–Pb-ВОЗРАСТ МЕТАМОРФИЗМА ПОРОД ВОРОНЦОВСКОЙ СЕРИИ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА ПО ДАННЫМ МИКРОЗОНДОВОГО ДАТИРОВАНИЯ МОНАЦИТОВ

© 2012 г. К. А. Савко, В. В. Хиллер, Н. С. Базиков, академик С. Л. Вотяков

Поступило 26.01.2012 г.

Монацит является наиболее часто используемым минералом-геохронометром для датирования метаморфизма, так как он имеет переменный состав, чутко реагирующий на изменение интенсивных и экстенсивных параметров. Поэтому он является идеальным геохронологическим сенсором метаморфических событий. В 1990-х годах был разработан метод химического электронно-зондового датирования U–Th-содержащих минералов [1]. Огромное число публикаций посвящено его применению для определения возраста различных геологических объектов (например, [2–4] и многие другие).

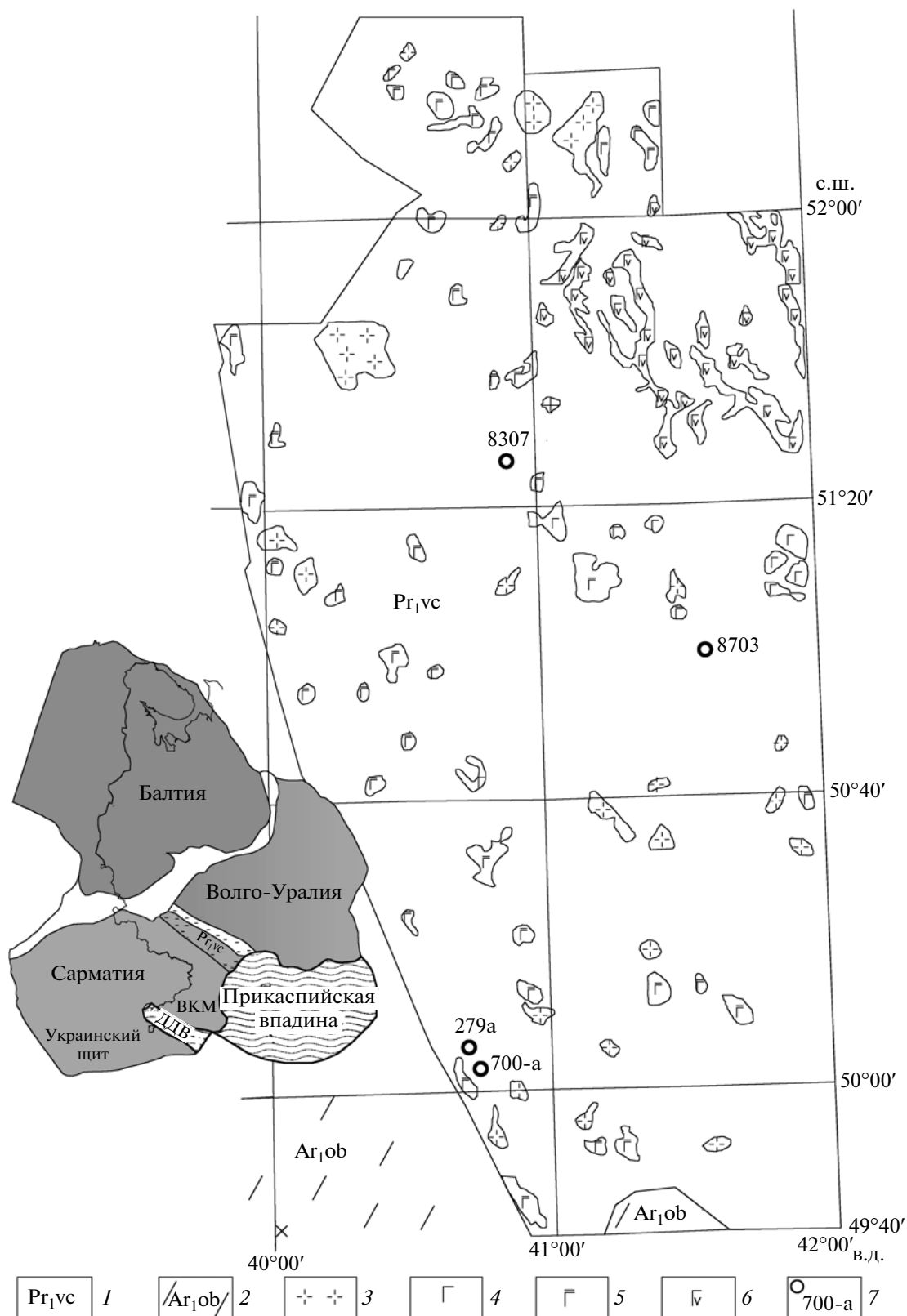
Объектом нашего исследования являются палеопротерозойские метатерригенные породы воронцовской серии, занимающие огромную площадь между докембрийскими коровыми сегментами Восточно-Европейской платформы – Сарматией и Волго-Уралией. Площадь ее распространения составляет более 100 000 км<sup>2</sup> (рис. 1). Мощность отложений по сейсмическим данным изменяется от 2–3 км в юго-западной части до 6–8 км в восточной. Литологически серия весьма однородна и представляет собой толщу метаморфизованных песчаниково-сланцевых флишоидных отложений. Отсутствие вулканитов в разрезах воронцовской серии не позволяет получить оценки возраста ее формирования по магматическим цирконам. При изучении зонального метаморфизма пород воронцовской серии были закартированы гранатовая (430–490°C), ставролитовая (490–520°C), ставролит-силлиманитовая (520–560°C), мусковит-силлиманитовая (560–600°C) и гранат-силлиманит-кордиеритовая зоны (600–750°C) [5]. Давления при метаморфизме изменяются от 3 до 5 кбар.

Конкордантный изотопный U–Pb-возраст метаморфизма, определенный по монофракции циркона из сланцев мусковит-силлиманитовой зоны, составляет  $2104 \pm 4$  млн лет, а возраст прорывающих их гранитов S-типа бобровского комплекса –  $2022 \pm 8$  млн лет [6]. По этим данным процессы метаморфизма и складчатости в воронцовской структуре предшествовали коллизионному магматизму, что противоречит известным геодинамическим моделям развития докембрийских складчатых областей. Для решения этой проблемы нами была предпринята попытка оценить возраст метаморфизма пород воронцовской серии по монациту. Монацит впервые появляется в верхах зеленосланцевой фации, и его интервал стабильности расширяется с увеличением температуры, включая гранулитовую фацию [7].

### МЕТОДИКА

Для датирования метаморфизма Th–U–Pb-методом на микрозонде Cameca SX 100 (ИГГ УрО РАН) были выбраны наиболее крупные монациты из образцов керна скважин метапелитов из разных зон метаморфизма (рис. 1). Поиск и идентификацию зерен монацита в шлифах проводили по их BSE-изображениям и энергодисперсионным спектрам; элементное картирование зерен – на основе измерения интенсивности пика и фона. Пределы обнаружения ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub> и PbO в монаците составляли от 170, 65 и 73 ppm соответственно. Съемку проводили при ускоряющем напряжении 15 кВ, ток пучка 240 нА. Время измерения интенсивности на пике для Th, U и Pb составляло по 400 с, для остальных элементов 10 с, на фоне – в два раза меньше. Погрешности определения элементов:  $\Delta\text{Th}/\text{Th} = 3.1\text{--}3.2$ ,  $\Delta\text{U}/\text{U} = 1.9\text{--}9.5$  и  $\Delta\text{Pb}/\text{Pb} = 1.9\text{--}2.7$  отн. %. Расчет возраста монацитов проводили с использованием оригинальной программы [4] в рамках двух альтернативных подходов: по единичным определениям содержаний

*Воронежский государственный университет  
Институт геологии и геохимии  
Уральского отделения Российской Академии наук,  
Екатеринбург*



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта востока ВКМ, масштаб 1:1 000 000. 1 – метатерригенные породы воронцовской серии; 2 – серые гнейсы (ТТГ) Россошанского блока и Варваринского выступа; 3 – граниты бобровского комплекса; 4 – нориты еланского комплекса; 5 – габброиды и гипербазиты мамонского комплекса; 6 – габбродолериты новогольского комплекса; 7 – местоположение скважин и их номера.

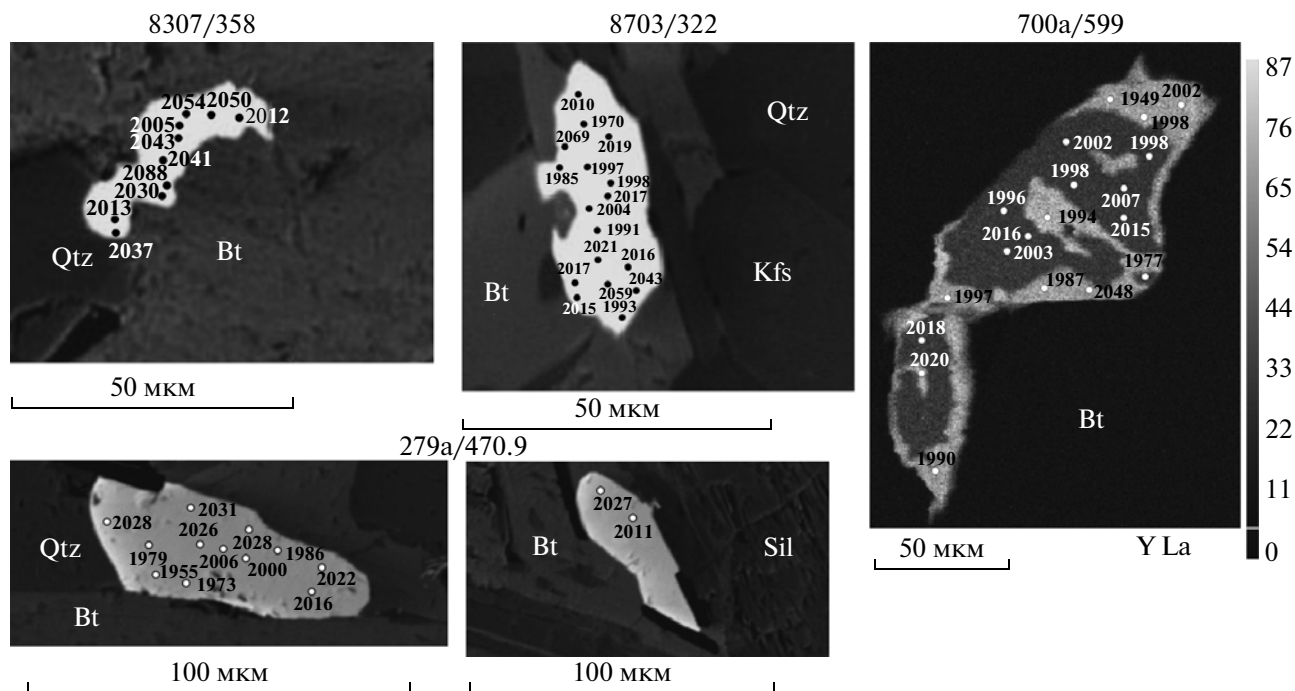


Рис. 2. Местоположения точек датирования монацитов и значения возрастов (млн лет), полученных в этих точках.

U, Th, Pb в точке зерна минерала [2] и из Th/Pb–U/Pb-псевдоизохроны [3].

Ставролитовая зона. Монацит из обр. 8307/358, выбранный для датирования, был проанализирован в 10 точках (рис. 2). По составу зерно незонально, содержание  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{UO}_2$  и PbO составляет 0.56–0.95; 0.58–0.79 и 0.28–0.34 мас. % соответственно (табл. 1). По содержаниям U, Th, Pb были выполнены расчеты возраста монацита по методу Ж.-М. Монтея с соавторами [2], получены значения в интервале от 2005 до 2088 млн лет (табл. 1, рис. 2), средневзвешенное значение –  $2037 \pm 50$  млн лет, СКВО = 0.096 (рис. 3). При расчете значения возраста по усовершенствованной методике [3] с помощью Th/Pb–U/Pb-диаграммы были получены близкие средневзвешенные оценки –  $2039.5 \pm 26$  млн лет, СКВО = 0.38 (рис. 3).

Мусковит-силлиманитовая зона. Для определения возраста выбранное удлиненное зерно из гранат-силлиманит-биотит-мусковитового гнейса (обр. 8703/322) было проанализировано в 17 точках (рис. 2). Содержания тория обнаруживают широкий интервал значений (1.92–4.16 мас. %  $\text{ThO}_2$ ), но закономерности в его распределении по зерну отсутствуют. Сами концентрации  $\text{ThO}_2$  в 2–4 раза выше, чем в монаците из ставролитовой зоны. Содержания  $\text{UO}_2$  и PbO значительно ниже, чем  $\text{ThO}_2$  (0.36–0.67 и 0.32–0.58), и также не обнаруживают закономерного распределения. В отдельных образцах из мусковит-силлиманитовой

зоны в зернах монацита отмечаются узкие каймы, обогащенные иттрием.

В 17 точках выполнены расчеты возраста монацита и получены значения в интервале от 1970 до 2069 млн лет, средневзвешенное значение  $2013 \pm 43$  млн лет, СКВО = 0.073 (табл. 1, рис. 2, 3). При расчете значений возраста с помощью построения Th/Pb–U/Pb-диаграммы были получены близкие средневзвешенные оценки с меньшей погрешностью  $2015 \pm 14$  млн лет СКВО = 0.30 (рис. 3).

Силлиманит-калшпат-кордьеритовая зона. Химическое Th–U–Pb-датирование монацитов было выполнено для образцов 700a/599 и 279a/470.9 гранат-силлиманит-кордьеритовых гнейсов (рис. 1). Монацит из обр. 700a/599 имеет зональное строение (рис. 2). Центральные и краевые части кристалла различаются по содержанию Y и U, но при этом содержание Th в них близкое. Концентрация иттрия в центральной зоне зерна высокая – 2.3–3.3 мас. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , а урана пониженная – 0.13–0.23 мас. %  $\text{UO}_2$ . В зоне каймы кристалла концентрация иттрия падает до 0.86–0.99 мас. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , а урана возрастает до 0.54–0.68 мас. %  $\text{UO}_2$ .

Из точечных определений содержаний U, Th, Pb были рассчитаны возраста монацита в интервале от 1949 до 2048 млн лет (табл. 1), средневзвешенное значение –  $2002 \pm 42$  млн лет, СКВО = 0.040 (рис. 2, 3). В высоко- и низкоиттриевых зонах точечные значения возрастов лежат в пределах

**Таблица 1.** Концентрации Th, U и Pb в монацитах и возраст в точках анализа, рассчитанные по [2]

Точка	Содержание, ppm			Стандартное отклонение, ppm			Отн. погрешность, %			Возраст, млн лет	Ошибка, ± млн лет
	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	PbO	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	PbO	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	PbO		
8307/358											
1	9186	6815	3095	330	96	77	3.59	1.41	2.49	2005	81
2	5607	6672	2775	234	96	74	4.17	1.44	2.67	2030	83
3	8082	7066	3097	300	97	77	3.71	1.37	2.49	2013	79
4	8797	7576	3408	319	100	79	3.63	1.32	2.32	2050	76
5	6543	7850	3224	258	101	78	3.94	1.29	2.42	2012	74
6	9502	6756	3197	339	96	78	3.57	1.42	2.44	2054	81
7	8094	5830	2732	300	92	75	3.71	1.58	2.75	2043	89
8	9502	6891	3219	339	97	78	3.57	1.41	2.42	2041	81
9	8121	7220	3299	301	98	79	3.71	1.36	2.39	2088	79
10	7504	6789	2997	283	96	75	3.77	1.41	2.50	2037	81
8703/322											
1	37133	5384	5104	1165	87	93	3.14	1.62	1.82	2010	87
2	26498	4105	3646	842	82	82	3.18	2.00	2.25	1970	96
3	22394	3565	3162	719	80	78	3.21	2.24	2.47	1997	103
4	41625	6225	5767	1301	91	99	3.13	1.46	1.72	2004	83
5	19629	4298	3163	636	84	78	3.24	1.95	2.47	1998	98
6	28628	4410	3966	907	84	84	3.17	1.90	2.12	1985	94
7	35346	6742	5425	1111	94	96	3.14	1.39	1.77	2017	81
8	31478	5383	4553	993	88	89	3.15	1.63	1.95	1991	87
9	20533	4380	3315	663	84	79	3.23	1.92	2.38	2021	97
10	21275	4316	3352	685	83	79	3.22	1.92	2.36	2017	97
11	27254	4911	4082	865	86	85	3.17	1.75	2.08	2016	91
12	19170	4547	3292	623	85	79	3.25	1.87	2.40	2043	97
13	24415	5997	4302	780	92	87	3.19	1.53	2.02	2059	86
14	36463	5403	5065	1145	88	93	3.14	1.63	1.84	2015	87
15	21336	5979	3863	688	92	84	3.22	1.54	2.17	1993	85
16	22313	5632	3893	717	90	84	3.21	1.60	2.16	2019	88
17	20744	3842	3239	670	82	79	3.23	2.13	2.44	2069	103
279a/470.9											
1	29700	5663	4580	943	94	91	3.17	1.65	1.99	2026	88
2	29547	6987	4900	935	97	91	3.17	1.38	1.86	1986	80
3	31651	5875	4682	999	91	90	3.16	1.55	1.91	1973	84
4	30944	5995	4613	978	91	89	3.16	1.52	1.93	1955	83
5	31118	5546	4544	983	90	88	3.16	1.62	1.95	1979	86
6	29670	6998	5036	939	97	92	3.17	1.38	1.83	2028	80
7	34264	7618	5669	1078	100	98	3.15	1.31	1.73	2031	78
8	32877	6025	4930	1036	92	92	3.15	1.53	1.86	2006	84
9	29295	6411	4803	928	94	90	3.17	1.47	1.88	2028	83
10	30229	6215	4743	956	93	90	3.16	1.50	1.91	2000	84
11	29666	6247	4750	939	93	90	3.17	1.49	1.89	2016	84
12	31077	6554	4995	982	95	92	3.16	1.44	1.84	2022	82
13	29644	6929	5009	938	96	92	3.17	1.39	1.84	2027	81
14	29828	6927	4976	944	96	92	3.16	1.39	1.84	2011	80

Таблица 1. Окончание

Точка	Содержание, ppm			Стандартное отклонение, ppm			Отн. погрешность, %			Возраст, млн лет	Ошибка, ± млн лет
	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	PbO	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	PbO	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	PbO		
700a/599											
1	34052	1292	3435	1072	67	78	3.15	5.20	2.26	1998	117
2	33779	6213	5052	1063	117	90	3.15	1.88	1.79	1998	86
3	34867	6271	5180	1096	118	91	3.14	1.87	1.75	2003	85
4	34279	2638	3886	1079	81	81	3.15	3.08	2.08	1990	105
5	32132	3572	4137	1014	91	84	3.16	2.55	2.04	2048	101
6	34827	6113	5105	1095	116	91	3.15	1.89	1.77	1996	86
7	35390	6157	5227	1112	117	91	3.14	1.90	1.75	2016	86
8	34292	5743	4940	1079	112	89	3.15	1.94	1.80	1998	87
9	32816	5395	4703	1034	108	88	3.15	2.01	1.87	2002	89
10	34295	5914	4938	1079	114	89	3.15	1.92	1.81	1977	86
11	31920	2341	3574	1007	78	79	3.15	3.32	2.21	1987	108
12	32642	1252	3294	1028	66	76	3.15	5.30	2.31	1997	118
13	37456	6785	5629	1175	123	93	3.14	1.81	1.66	2018	83
14	36610	4780	4884	1149	101	88	3.14	2.11	1.79	2020	91
15	34775	3356	4175	1093	87	82	3.14	2.60	1.97	1994	99
16	35042	6447	5269	1101	119	91	3.14	1.85	1.73	2007	84
17	35661	6250	5279	1120	117	91	3.14	1.87	1.72	2015	85
18	33623	2299	3632	1058	78	79	3.15	3.38	2.17	1949	106
19	32756	1663	3451	1032	72	77	3.15	4.32	2.24	2002	114

погрешности измерений, и основания выделять по возрасту центральную и периферическую зоны отсутствуют. На Th/Pb–U/Pb-диаграмме (рис. 3) средневзвешенное значение возраста составляет  $2004 \pm 19$  млн лет, СКВО = 0.15, что сопоставимо со средневзвешенным значением  $2002 \pm 42$  млн лет, но с меньшей погрешностью.

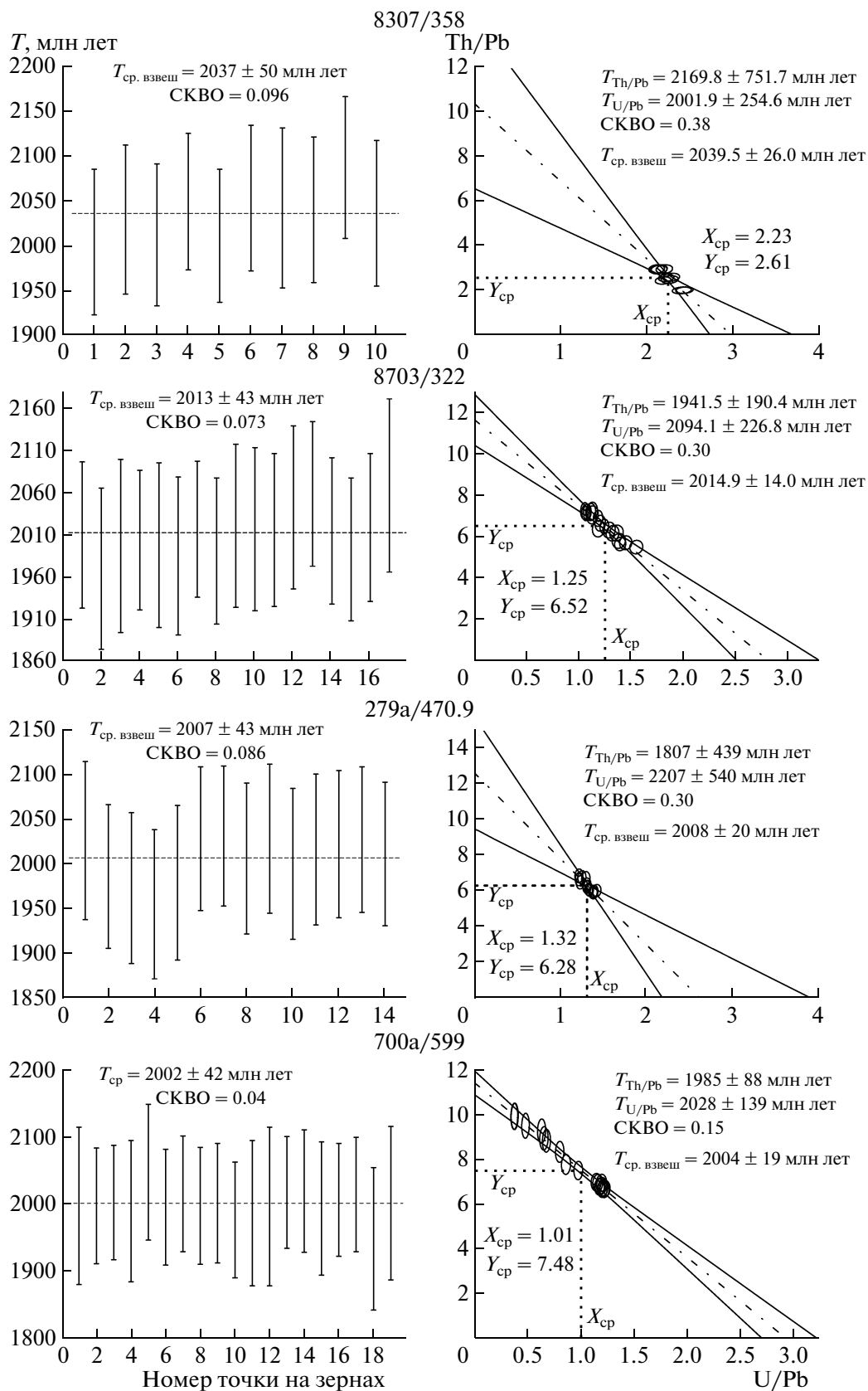
В образце 279a/470.9 проанализировано два небольших зерна монацита. Более крупное удлиненное зерно размером  $30 \times 60$  мкм в ассоциации с кварцем и биотитом было проанализировано в 12 точках, более мелкое в контакте с силлиманитом и биотитом – еще в двух точках (рис. 2). В отличие от монацита из обр. 700a/599 четкой зональности по Y и U не наблюдается.

По точечным определениям содержаний U, Th, Pb получены значения возраста от 1955 до 2028 млн лет (табл. 1), средневзвешенное значение  $2007 \pm 43$  млн лет, СКВО = 0.086 (рис. 3). При расчете возраста с помощью Th/Pb–U/Pb-диаграммы получены средневзвешенные оценки с меньшей погрешностью  $2008 \pm 20$  млн лет (рис. 3), очень близкие к полученным значениям для монацита из обр. 700a/599 из той же силлиманит-каллишпат-кордиеритовой зоны. Тот факт, что мы

получили практически одинаковые возраста для монацитов из образцов пород воронцовской серии, удаленных друг от друга почти на 300 км, подтверждает их надежность.

Накопление мощных толщ терригенных осадков воронцовской серии происходило в интервале 2200–2100 млн лет за счет размыва континентальной коры Волгоуральского сегмента [8]. Конкордантный возраст кластогенных цирконов из биотит-мусковитовых гнейсов воронцовской серии от  $2129 \pm 15$  до  $2208 \pm 22$  млн лет (SHRIMP II, ВСЕГЕИ – неопубликованные данные А.В. Самсонова и А.Н. Ларионова). Таким образом, возраст метаморфизма  $2104 \pm 4$  млн лет, определенный по монофракции цирконов [6], очень близок к оценкам возраста детритовых цирконов. Проблема датирования возраста метаморфизма по цирконам заключается в сохранности либо самих детритовых цирконов, либо их ядер с рекристаллизованными каймами при метаморфизме. Все цирконы в породах воронцовской серии являются детритовыми или сохраняют детритовые ядра.

Итак, возраст зонального метаморфизма пород воронцовской серии составляет: для ставро-



**Рис. 3.** Вариации значений возрастов монацитов, рассчитанных по единичным точкам, и величина средневзвешенного возраста по [2] и по графикам Th/Pb–U/Pb [3].

литовой зоны –  $2039 \pm 26$ , для мусковит-силлиманитовой –  $2015 \pm 14$ , для силлиманит-калишпат-кордиеритовой –  $2004 \pm 19$  млн лет. Эти данные предполагают субсинхронность регионального метаморфизма и внедрения коллизионных гранитов S-типа бобровского комплекса на рубеже 2020 млн лет.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 09–05–00513, 09–05–00821) и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (госконтракт № 02.740.11.0727).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Suzuki K., Adachi M., Tanaka T.* // *Sedim. Geol.* 1991. V. 75. P. 141–147.
2. *Montel J.M., Foret S., Veschambre M., et al.* // *Chem. Geol.* 1996. V. 131. P. 37–53.
3. *Cocherie A., Albaredo F.* // *Geochim. et cosmochim. acta.* 2001. V. 65. № 24. P. 4509–4522.
4. *Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Шапова Ю.В. и др.* // *Литосфера.* 2010. № 4. С. 94–115.
5. *Савко К.А., Герасимов Ю.В.* Труды НИИГ Воронеж. ун-та. Воронеж, 2002. В. 8. 131 с.
6. *Бибикова Е.В., Богданова С.В., Постников А.В. и др.* // *Стратиграфия и геол. корреляция.* 2009. № 6. С. 3–16.
7. *Савко К.А., Базиков Н.С.* // *Петрология.* 2011. Т. 19. № 5. С. 467–492.
8. *Савко К.А., Самсонов А.В., Базиков Н.С.* // *Вестн. Воронеж. ун-та. Геология.* 2011. № 1. С. 70–94.