

## Th-U-Pb-ВОЗРАСТ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ГРАНИТНЫХ ПЕГМАТИТОВ В ВОСТОЧНОМ ЭКЗОКОНТАКТЕ АДУЙСКОГО МАССИВА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

В. В. Хиллер, М. П. Попов, Ю. В. Ерохин, А. В. Захаров

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург*

Поступила в редакцию 20 июля 2015 г.

**Аннотация:** впервые получены данные о возрасте редкометальных гранитных пегматитов, расположенных в восточном экзоконтакте Адуйского массива, в окрестностях г. Асбест (Средний Урал). В жильных телах Квартального редкометального месторождения установлены акцессорные минералы – монацит и уранинит и выполнено микрозондовое исследование их химического состава. Методом химического Th-U-Pb датирования определен возраст, в том числе с применением двухминеральной изохроны. Значение возраста составляет  $267,9 \pm 2,1$  млн лет. Становление редкометальных гранитных пегматитов в восточном экзоконтакте Адуйского массива происходило в среднепермское время.

**Ключевые слова:** химическое датирование, уранинит, монацит, рентгеноспектральный микроанализ (РСМА), геохронология.

### Th-U-Pb DATING OF GRANITE RARE-METAL PEGMATITE IN THE EASTERN EXOCONTACT OF ADUISKY MASSIF (MIDDLE URALS)

**Abstract:** rare-metal granite pegmatite were first dated at the eastern outer contact of the Aduisky massif, near the town of Asbest, Central Urals. Monazite and uraninite are found in veins at the Kvartalnoye deposit and were analyzed on a microprobe. The age was calculated based on chemical Th-U-total Pb data. The two mineral isochrones yield an age of  $267,9 \pm 2,1$  Ma. The pegmatite-forming event occurred in the Middle Permian at the eastern outer contact of the Aduisky massif.

**Key words:** chemical dating, uraninite, monazite, electron probe microanalysis (EPMA), geochronology.

#### Введение

Гранитные пегматиты в восточном обрамлении Адуйского массива зачастую несут промышленное редкометальное оруденение. Здесь расположены тантал-ниобиевые месторождения: Квартальное, Полуденское, Липовый лог, Красноармейское и многие другие, а также Южно-Шамейское месторождение молибдена (рис. 1). Некоторые из этих объектов уже отработаны, но большая их часть законсервирована по разным причинам. Детальное геологическое строение и некоторые особенности рудной минерализации этих месторождений приведены в работе [1]. Изучение редкометальных гранитных пегматитов Адуйского массива до сих пор не носило систематического характера, несмотря на близость к транспортной и промышленной инфраструктуре, а также на потребности нашей экономики в редких металлах.

#### Объект исследования

Квартальное тантал-ниобиевое месторождение было открыто в 1953 году и на данный момент частично отработано. Оно расположено в 100 метрах восточнее от контакта Адуйского гранитного массива и представлено скоплением крупных пегматитовых

тел, залегающих среди амфиболитов, диоритов и серпентинитов. Основные пегматитовые жилы месторождения (Западная, Южная и Слепая) залегают в эндоконтактной полосе шириной 220–230 м. Восточной границей месторождения служат субмеридиональные дайки пироксеновых порфириров. Западная часть месторождения захватывает эндоконтактную полосу Адуйского гранитного массива, также насыщенную пегматитовыми жилами. В пределах месторождения встречены одиночные слюдитовые жилы, содержащие низкосортную изумрудную минерализацию. В непосредственной близости от Квартального месторождения находятся изумрудно-берилловые проявления, которые входят в состав Уральской Изумрудоносной полосы [1–3].

Гранитные пегматиты имеют мощность в несколько десятков метров и несут постмагматические изменения в виде грейзенизации, с которой и связано промышленное оруденение [1–3]. Акцессорная минералогия пегматитов следующая: танталит, колумбит, гранат, апатит, берилл, циркон, ганит, касситерит, уранпирохлор, торит, турмалин, топаз, рутил, титанит, эпидот, халькозин, молибденит, пирит, сфалерит, халькопирит, борнит, гематит [4–5 и др.]. В последнее

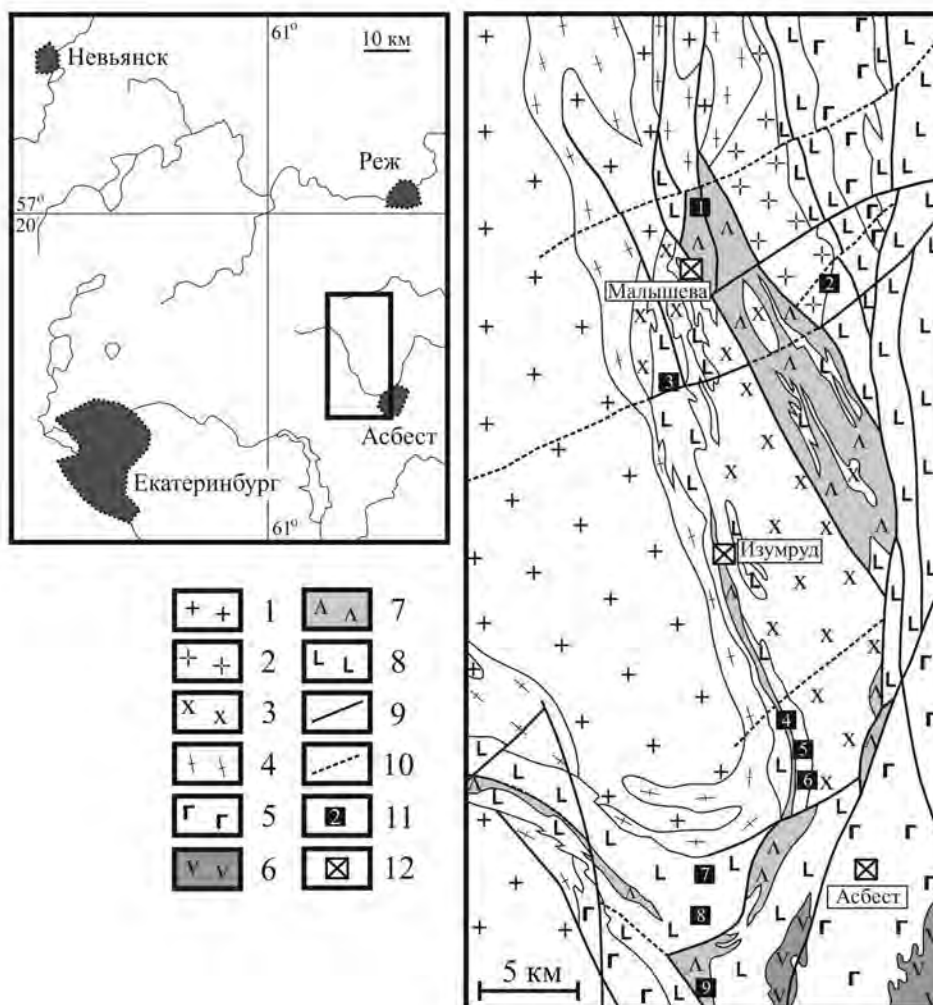


Рис. 1. Геологическая схема расположения редкометалльных пегматитов в восточном обрамлении Адуйского массива (по [5] с дополнениями). Условные обозначения: 1 – гранитоиды Адуйского массива; 2 – лейкограниты Малышевского массива; 3 – диориты Лесозаводского массива; 4 – гранито-гнейсовое обрамление Адуйского массива; 5 – габбро Баженовского офиолитового комплекса; 6 – гипербазиты Баженовского комплекса; 7 – оталькованные и слюдитовые апогипербазитовые породы; 8 – вулканогенно-осадочная толща; 9 – зоны разломов (установленные); 10 – зоны разломов (предполагаемые); 11 – редкометалльные месторождения (цифрами: 1 – Полуденское, 2 – Южно-Шамейское, 3 – "Загребавская точка", 4 – Квартальное, 5 – "жила № 40", 6 – Липовый лог, 7 – "участок № 5", 8 – "участок № 293", 9 – Красноармейское); 12 – населенные пункты.

время в гранитных пегматитах Квартального месторождения установлена висмутовая минерализация – самородный висмут, висмутин, тетрадимит, жозеит-В, хедлеит, эвлетин, бисмутит и пухерит [6]. Нами в гранитных пегматитах Квартального месторождения впервые установлены уранинит и монацит, а также получен их возраст.

#### Метод исследования

Количественный анализ состава минералов выполнен на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX 100 (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург). Условия измерения: ускоряющее напряжение 15 кВ, сила тока 200–300 нА, диаметр пучка электронов 2 мкм. Время измерения интенсивности на пике для Th, U и Pb в уранините по 60 с, в монаците по 120 с, соответственно, для Y и Si по 20 с, для остальных элементов 10 с; на фоне – в два раза меньше. Стандартные образцы: ThO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, Pb<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, диопсид, синтетические фосфаты РЗЭ. Пределы обнаружения Th, U и Pb в

уранините составили около 260, 580 и 220 г/т, в монаците – 145, 260 и 125 г/т, соответственно. Среднее значение содержания по 22 точкам анализа уранинита: U = 76,20±0,60 мас.%, Th = 5,71±0,16 мас.%, Pb = 2,99±0,05 мас.%, по 6 точкам анализа монацита: Th = 9,11±0,23 мас.%, U = 0,34±0,03 мас.%, Pb = 0,12±0,01 мас.%. Теоретическое и практическое обоснование метода химического датирования с помощью рентгеноспектрального микрозондового анализа приведено в многочисленных публикациях по данной теме [7–8 и др.], в том числе и нами [9–10]. Основное условие данного метода: в процессе эволюции минерал не терял радиогенный свинец (т.е. Th-U-Pb система была закрытой), то есть весь свинец в минерале накопился за счет распада тория и урана.

#### Результаты исследования

Уранинит распылен по всей матрице пегматита и установлен как в виде включений в цирконе, так и в виде отдельных, относительно крупных, кубоок-

таэдров, размером до 100 мкм (рис. 2). Вокруг зерен уранинита отмечаются плеохроичные дворики. По данным микрозондового анализа минерал содержит значительные примеси тория, свинца (см. табл. 1, ан. 1–22) и характеризуется суммой близкой к 100 %, что говорит об отсутствии вторичных изменений в урани-

ните. При расчете возраста методом химического датирования по 22 единичным измерениям, датировка уранинита попадает в узкий интервал значений 257–274 млн лет, при средневзвешенном значении  $267,5 \pm 2,8$  млн лет, СКВО = 0,49, вероятность соответствия (P) = 0,98.

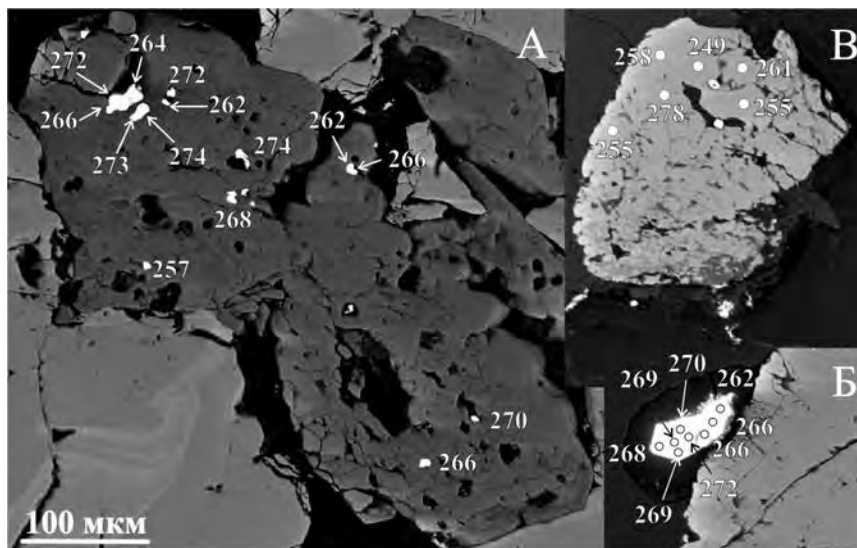


Рис. 2. Акцессорные зерна уранинита и монацита (с вынесенными возрастaми в каждой точке анализа) в матрице гранитного пегматита Квартального месторождения. А – включения уранинита в индивиде циркона (темно-серый), расположенного в матрице ферроколумбита (светло-серый); Б – зерно уранинита (уплощенный кубооктаэдр) на границе с индивидом ферроколумбита; В – зерно монацита в кварц-полевошпатовом агрегате. BSE-изображение, Cameca SX 100.

Таблица 1

*Химический состав (в мас. %) уранинита (№ 1-22) и монацита (№ 23-28)*

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,03	0,04	0,00	0,01	0,03	0,18	0,01	0,02	0,06
ThO <sub>2</sub>	7,13	6,05	7,17	9,07	7,97	6,14	5,61	8,26	9,74	8,11
UO <sub>2</sub>	86,46	85,92	82,38	84,97	86,48	84,90	80,16	85,48	82,31	83,58
SiO <sub>2</sub>	0,02	0,11	0,26	0,06	0,00	0,25	1,19	0,08	0,25	0,14
PbO	3,30	3,28	3,06	3,25	3,19	3,21	2,91	3,21	3,18	3,07
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	0,00	0,01	0,14	0,00	0,11	0,05	0,00	0,01	0,08
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,00	0,02	0,04
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,05	0,07	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04	0,03	0,00
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,71	1,41	1,90	0,12	0,11	0,63	0,94	0,69	0,97	0,85
CaO	0,00	0,14	0,03	0,01	0,00	0,02	0,09	0,00	0,00	0,02
Сумма	97,97	97,04	94,98	97,71	97,86	95,42	91,17	97,80	96,53	95,96

Продолжение табл. 1

№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ThO <sub>2</sub>	7,91	6,16	5,10	5,08	4,21	5,70	5,64	5,94	5,97	5,29
UO <sub>2</sub>	84,43	86,27	82,26	90,34	91,18	89,53	89,77	89,67	89,62	90,04
SiO <sub>2</sub>	0,32	0,23	2,91	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
PbO	3,15	3,20	2,92	3,35	3,38	3,38	3,30	3,31	3,26	3,37
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,07	0,12	0,09	0,08	0,13	0,03	0,09	0,06	0,03
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,07
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,00	0,04	0,06	0,04	0,00	0,00	0,09	0,08	0,01
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,12	0,00	0,00	0,00	0,06
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	0,07	0,00	0,09	0,08	0,05	0,00	0,00	0,16	0,00
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,99	0,97	0,79	0,21	0,23	0,18	0,10	0,06	0,08	0,18
CaO	0,01	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
Сумма	97,14	96,95	94,48	99,21	99,24	99,11	98,86	99,19	99,24	99,06

№	21	22	23	24	25	26	27	28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	29,30	29,71	29,48	29,79	29,43	29,87
ThO <sub>2</sub>	4,30	6,44	10,89	8,08	11,89	11,51	11,99	7,83
UO <sub>2</sub>	90,98	85,07	0,40	0,29	0,36	0,54	0,50	0,24
SiO <sub>2</sub>	0,00	1,22	0,48	0,42	0,69	0,41	0,57	0,36
PbO	3,37	3,20	0,13	0,10	0,14	0,14	0,15	0,10
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	0,11	28,82	30,24	27,96	27,74	28,72	30,25
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,03	15,75	15,68	22,42	15,96	15,72	14,68
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	0,07	6,39	7,74	3,72	5,98	5,98	7,96
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	2,51	2,91	1,72	2,41	2,39	2,94
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	2,18	2,41	0,51	1,96	1,77	2,58
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	1,00	1,18	0,14	1,04	0,81	1,63
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,22	0,42	0,48	0,40	0,08	0,50	0,42	0,66
CaO	0,00	0,00	1,80	1,30	1,89	1,98	2,03	1,36
Сумма	99,10	96,56	100,15	100,47	100,99	99,97	100,48	100,45

Монацит также распылен по всей матрице пегматита и слагает отдельные крупные зерна, размером до 250 мкм (рис. 2). По химическому составу фосфат (см. табл., ан. 23-28) относится к цериевой разновидности и характеризуется высоким содержанием тория (ThO<sub>2</sub> до 12 мас.%), а также небольшими примесями U, Pb, Y, Si, Ca. Каких-либо вторичных изменений в монаците не установлено. Средневзвешенный возраст монацита, рассчитанный по 6 единичным измерениям, составляет 259±27 млн лет, СКВО = 0,06.

При построении зависимости PbO-UO<sub>2</sub>\* по совокупности точек анализа, уранинит и монацит попадают на одну прямую (или изохрону по [11]), что говорит об их одновременном образовании. Расчёт возраста по углу наклона изохроны даёт датировку 267,9±2,1 млн лет, СКВО = 0,66 (рис. 3). При этом линия пересекает начало координат, что говорит об отсутствии привноса или выноса свинца в процессе эволюции данных минералов.

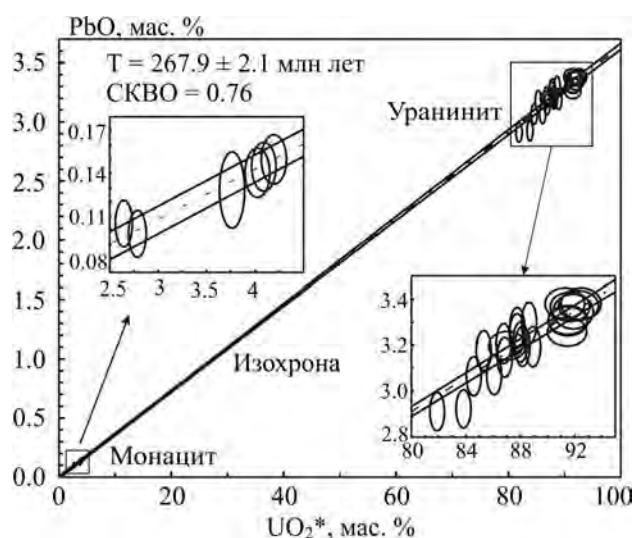


Рис. 3. Изохрона UO<sub>2</sub>\*-PbO по результатам анализов уранинита и монацита. UO<sub>2</sub>\* = (UO<sub>2</sub>+ThO<sub>2</sub><sup>экв</sup>), где ThO<sub>2</sub><sup>экв</sup> – содержание тория, пересчитанное в эквивалентное содержание урана, способное произвести то же количество Pb за время жизни системы при равенстве U-Pb и Th-Pb-значений возраста.

### Обсуждение результатов

Полученный нами возраст гранитных пегматитов Квартального тантал-ниобиевого месторождения достаточно хорошо соотносится с датировкой редкометалльных пегматитов из рядом расположенного однотипного месторождения Липовый лог – 262,0±7,3 млн лет (по данным Re-Os возраста молибденитов [12]). Интересно, что изученные нами гранитные редкометалльные пегматиты Липовского силикатно-никелевого месторождения, расположенные значительно севернее (на стыке Адуйского и Мурзинского гранитных массивов), также дают близкую датировку – 266,4±2,6 млн лет (Th-U-Pb-возраст по трехминеральной изохроне с уранинитом, коффинитом и монацитом [13]).

При этом ранее утверждалось [14], что редкометалльные пегматиты Квартального месторождения относятся к мезозойским образованиям и имеют возраст – 196,5±1,9 млн лет (Rb-Sr-датирование по валу пегматита и минеральным монофракциям). Также "омоложенные" возраста этих же жильных тел (239±5 млн лет) приводились и по данным K-Ar-изучения монофракций слюд из пегматитов [15]. Эти молодые датировки показывают, что Rb-Sr и K-Ar изотопные системы в гранитных пегматитах оказались неустойчивыми в зоне влияния крупного Сусанского тектонического разлома, обрамляющего большую часть восточного контакта Адуйского гранитного массива.

### Выводы

Таким образом, нами в редкометалльных гранитных пегматитах Квартального месторождения обнаружены и изучены монацит и уранинит. По результатам химического датирования данных минералов установлен среднепермский возраст кристаллизации этих жильных пород. Можно утверждать, что становление редкометалльных гранитных пегматитов в восточном экзоконтакте Адуйского массива происходило в интервале 268–262 млн лет.

*Исследования выполняются при поддержке ФАНО в рамках программы УрО РАН, проект № 15-18-5-15.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Золоев, К. К. Минерогения и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала / К. К. Золоев, В. Я. Левин, С. И. Мормиль, Г. Ю. Шардакова. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН–УГСЭ. – 2004. – 336 с.
2. Левин, В. Я. Геология и минерогения редкометалльных пегматитов Адуйского рудного поля / В. Я. Левин, А. Ф. Ласковенков, С. И. Мормиль, Б. К. Львов, Н. И. Петрова // Геология и металлогения Урала. – Екатеринбург: УГСЭ. – 2000. – С. 108–151.
3. Грабежнев, А. И. Редкометалльные кали-натровые пегматиты одного из экзоконтактовых пегматитовых полей Урала / А. И. Грабежнев, Н. Е. Чистяков // Метасоматоз и рудообразование. – Свердловск: УНЦ АН СССР. – 1974. – С. 104–124.
4. Солодов, Н. А. Внутреннее строение и геохимия редкометалльных гранитных пегматитов / Н. А. Солодов. – М.: АН СССР. – 1962. – 235 с.
5. Попов, М. П. Геолого-минералогические особенности редкометалльной минерализации в восточном экзоконтакте Адуйского массива в пределах Уральской изумрудноносной полосы / М. П. Попов. – Екатеринбург, УГГУ. – 2014. – 136 с.
6. Суставов, С. Г. Висмутовая минерализация на Кварцальном месторождении редкометалльных пегматитов (Средний Урал) / С. Г. Суставов, М. П. Попов, В. Н. Огородников // Вестник Уральского отделения РМО. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. – 2014. – № 11. – С. 98–104.
7. Montel, J.-M. Electron microprobe dating of monazite / J.-M. Montel, S. Foret, M. Veschambre, C. Nicollet, A. Provost // Chem. Geol. – 1996. – V. 131. – P. 37–53.
8. Suzuki, K. CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data / K. Suzuki, T. Kato // Gondwana Research. – 2008. – V. 14. – P. 569–586.
9. Хиллер, В. В. Состав, кристаллохимия, эволюция U-Th-Pb-системы ряда минералов-геохронометров по данным экспериментального исследования и компьютерного моделирования: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / В. В. Хиллер. – Екатеринбург. – 2010. – 23 с.
10. Иванов, К. С. Изотопное и химическое U-Pb-датирование гранитоидов Западно-Сибирского мегабассейна / К. С. Иванов, Ю. В. Ерохин, Ю. Н. Федоров, В. В. Хиллер, В. С. Пономарев // Доклады АН. – 2010. – Т. 433(5). – С. 671–674.
11. Suzuki, K. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrain, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime / K. Suzuki, M. Adachi // Geochem. Jour. – 1991. – V. 25. – P. 357–376.
12. Mao, J. Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, Central Urals, Russia / J. Mao, A. Du, R. Seltmann, J. Yu // Mineralium Deposita. – 2003. – V. 38. – P. 251–257.
13. Хиллер, В. В. Th-U-Pb-датирование гранитных пегматитов Липовского рудного поля (Урал) по трем минералам / В. В. Хиллер, Ю. В. Ерохин, А. В. Захаров, К. С. Иванов // Доклады АН. – 2014. – Т. 455(2). – С. 216–219.
14. Попов, В. С. Возраст и возможные источники гранитов Мурзинско-Адуйского блока, Средний Урал: Rb-Sr и Sm-Nd изотопные данные / В. С. Попов, В. И. Богатов, А. Ю. Петрова, Б. В. Беляцкий // Литосфера, 2003. – № 4. – С. 3–18.
15. Смирнов, В. Н. Результаты K-Ar датирования Адуйского гранитного массива (восточный склон Среднего Урала) / В. Н. Смирнов, К. С. Иванов, А. А. Краснобаев, И. Н. Бушляков, Б. А. Калеганов // Литосфера, 2006. – № 2. – С. 148–156.

*Институт геологии и геохимии УрО РАН*

*Хиллер В. В., старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук  
E-mail: hilvervit@mail.ru; Тел.: 8-908-9174231.*

*Попов М. П., старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук  
E-mail: popovm1@yandex.ru, Тел.: 8-902-2748707*

*Ерохин Ю. В., ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук  
E-mail: erokhin-yu@yandex.ru, Тел.: 8-950-1942752,*

*Захаров А. В., аспирант  
E-mail: zakharov-zav@yandex.ru, Тел.: 8(343)3716282*

*Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch*

*Khiller V. V., senior research worker, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences  
E-mail: hilvervit@mail.ru, Tel.: 8-908-9174231.*

*Popov M. P., senior research worker, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences  
E-mail: popovm1@yandex.ru, Tel.: 8-902-2748707*

*Erokhin Yu. V., leading research worker, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences  
E-mail: erokhin-yu@yandex.ru, Tel.: 8-950-1942752*

*Zakharov A. V., Post-graduate Student  
E-mail: zakharov-zav@yandex.ru, Tel.: 8(343)3716282*