

## НОВЫЕ ДАННЫЕ К ВОПРОСУ О ВОЗРАСТЕ КААХЕМСКОГО МАГМАТИЧЕСКОГО АРЕАЛА (ВОСТОЧНАЯ ТУВА)

А.М. Сугоракова, А.К. Хертек

*Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия*

Приведены все известные к настоящему времени геохронологические и Sm–Nd изотопные данные для Каахемского магматического ареала. Островодужный этап гранитоидного магматизма предварялся и сопровождался базальт-андезит-риолитовым вулканизмом. Аккреционно-коллизийный гранитоидный магматизм начинается внедрением габброидных массивов повышенной щелочности с внутриплитными характеристиками, отражающими существование Алтае-Саянской горячей точки мантии (мантийного плюма). В интервале времени с 512 до 474 млн лет нам известны 3 уровня проявления габброидного и 6 – гранитоидного магматизма, что говорит о практически непрерывном процессе гранитообразования. Преобладающая часть этих гранитоидов расположена на западе ареала. После перерыва в 20 млн лет, в интервале 455–445 млн лет, наступает следующий, основной этап гранитообразования – постколлизийный, также предваряемый формированием габброидов с внутриплитными метками. Гранитоиды этого этапа – гнейсовидные меланогранитоиды и двуполевошпатовые гранитоиды, занимают пространства в сотни километров и составляют основную часть Каахемского ареала. Различия в их химическом составе при синхронности формирования отражают особенности состава субстрата, из которых выплавлялись гранитоидные магмы. Для этого этапа также характерно проявление синхронного вулканизма с игнимбритовым типом извержений. Добавлены новые авторские геохронологические (U–Pb, млн лет) и изотопные ( $\epsilon\text{Nd}(T)$ ) данные: Тужема (габбро) –  $500 \pm 10$ , +6,2; Бахаревский порог (гнейсо-мигматиты) –  $504 \pm 4$ ; Ужеп-Чадал (кварцевые диориты) –  $456 \pm 5$ ; Сарыг-Чазы (двуполевошпатовые граниты) –  $453 \pm 3$ , +3,0.

**Ключевые слова:** Восточная Тува, Каахемский магматический ареал, гранитообразование, габброиды.

### Введение

Каахемский магматический ареал площадью более 30 000 км<sup>2</sup> представляет собой совокупность разнообразных магматических образований, сформированных за длительный период с венда по пермь (563–293 млн лет). Более 80% площади ареала занимают гранитоидные ассоциации в интервале 500–450 млн лет, которые составляют собственно Каахемский батолит, сформированный на аккреционно-коллизийном и постколлизийном этапах корообразования в Центральной Азии.

В последнее время появляется все больше данных, свидетельствующих, что масштабное гранитообразование обусловлено предварительным или сопутствующим базитовым магматизмом, вызванным внутриплитной активностью. На примере батолитов раннепалеозойских Алтае-Саянской складчатой области (АССО) [Руднев и др., 2006; 2013; 2015] показано, что эти грандиозные по своим масштабам геологические образования имеют сложное строение и сформированы сопряженными во времени и пространстве гранитоидными и габброидными ассоциациями.

Крупнейшим среди раннепалеозойских батолитов АССО является Каахемский батолит, охватывающий весь бассейн р. Каа-Хем (М. Енисей) до восточной границы с Монголией. Ввиду труднодоступности

центральных и восточных частей батолита предыдущими исследователями были изучены только западные участки – чуть более 30% площади. Автору удалось поработать восточнее 96° долготы и получить новые результаты.

В табл. 1 отражены все известные к настоящему времени геохронологические и Sm–Nd изотопные данные для Каахемского магматического ареала. Островодужный этап гранитоидного магматизма предварялся и сопровождался базальт-андезит-риолитовым вулканизмом. Аккреционно-коллизийный гранитоидный магматизм начинается внедрением габброидных массивов повышенной щелочности с внутриплитными характеристиками, отражающими существование Алтае-Саянской горячей точки мантии (мантийного плюма). В интервале с 512 до 474 млн лет нам известны 3 уровня проявления габброидного и 6 – гранитоидного магматизма, что говорит о практически непрерывном процессе гранитообразования. Преобладающая часть этих гранитоидов расположена на западе ареала.

После перерыва в 20 млн лет, в интервале 455–445 млн лет, наступает следующий, основной этап гранитообразования – постколлизийный, также предваряемый формированием габброидов с внутриплитными метками [Монгуш, Сугоракова, 2013]. Гранитоиды этого этапа – гнейсовидные меланогранитоиды позднепалеозойские [Руднев и др., 2006] и

двуполевошпатовые гранитоиды сархойские [Руднев и др., 2006], занимают пространства в сотни километров и составляют основную часть Каахемского ареала. Различия в их химическом составе при синхронности формирования отражают особенности состава

субстрата, из которых выплавлялись гранитоидные магмы. Для этого этапа также характерно проявление синхронного вулканизма с игнимбритовым типом извержений [Сугорокова, Монгуш, 2008, 2012; Сугорокова, 2014, 2016].

Таблица 1

Результаты геохронологических и изотопных исследований пород Каахемского магматического ареала

Table 1

Results of the geochronological and isotopic studies of rocks of Kaakhem magmatic area

Массив, географическая привязка	Комплекс (ассоциация)	Возраст, млн лет	Метод	$\epsilon\text{Nd}(T)$	Источник информации
<i>Островодужный магматизм</i>					
Коптинский	Диорит-тоналит-плагииграниты	563±4 556±3	U-Pb U-Pb	+6,5	Руднев и др., 2006 Гусев, Суфиев, 2017
Буренский	Тоналит-плагииграниты	536±4	Ar-Ar	+6,4	Руднев и др., 2006
<i>Аккреционно-коллизийный магматизм + Алтае-Саянская горячая точка мантии</i>					
<b>Зубовский</b>	<b>Монцогаббро-монцит-граносиениты</b>	<b>512±2</b> <b>520±3</b>	<b>Ar-Ar</b> <b>U-Pb</b>	<b>+2,6</b> <b>+3,1</b>	<b>Руднев и др., 2006</b> <b>Гусев, Суфиев, 2017</b>
<b>Тужема</b>	<b>Габбро-нориты биотитовые</b>	<b>500±10</b>	<b>U-Pb</b>	<b>+6,2</b>	<b>Сугорокова, 2015</b>
Бахаревский порог	Гнейсо-мigmatиты меланократовые	504±4	U-Pb		Сугорокова, 2015
Теректыг-Чедерский	Тоналит-плагииграниты	499±5 510-492±6	U-Pb U-Pb	+6,2 +5,7...+6,4	Руднев и др., 2015 Гусев, Суфиев, 2017
Кара-Осский	Диорит-тоналиты	490±3	U-Pb	+4,1	Руднев и др., 2015
Тапсинский	Диорит-тоналит-плагииграниты	486±4	U-Pb	+5,3	Руднев и др., 2015
<b>Мажалыкский, оз. Чагытай</b>	<b>Перидотит-пироксенит-габбронориты</b>	<b>484±2</b> <b>478±2</b>	<b>U-Pb</b> <b>Ar-Ar</b>	<b>+4,8...+5,7</b>	<b>Сальникова и др., 2003;</b> <b>Бородин и др., 2004</b>
Раннетаннуольский, р. Бай-Сют	Диорит-тоналит-плагииграниты	479±2	U-Pb	+4,1	Руднев и др., 2015
Чарашский, р. Бай-Сют	Тоналит-плагииграниты	474±4	U-Pb	+3,9	Руднев и др., 2006
<i>Постколлизийный магматизм + Алтае-Саянская горячая точка мантии</i>					
<b>Шуйский</b>	<b>Габбро-габбронориты</b>	<b>449±4,2</b>	<b>U-Pb</b>	<b>+2,7</b>	<b>Монгуш, Сугорокова, 2013</b>
Позднетаннуольский, Ужеп-Чадал	Кварцевые диориты-тоналиты	456±5	U-Pb		Сугорокова, 2015
Позднетаннуольский, с. Эржей	Диорит-тоналит-плагииграниты	451±5,7	U-Pb	+3,4	Козаков и др., 1998
Бренский, с. Сизим	Гранодиориты-граниты	450±5	U-Pb	+1,7...+0,4 +4,8	Руднев и др., 2006 Сугорокова, 2014
Байбалыкский	двуполевошпатовые	455±5	U-Pb		Козаков и др., 2003
Сарыгчазинский		453±3	U-Pb	+3,0	Сугорокова, 2015
Белбейская мульда	Игнимбриты	446±6	U-Pb	+2,8...+4,1	Сугорокова, 2014, 2016
<i>Внутриплитный магматизм</i>					
<b>Чадалский</b>	<b>Оливиновые габбро, габбронориты биотитовые</b>	<b>Минглинг со щелочными гранитоидами</b>		<b>+4,2</b>	<b>Сугорокова, 2008; Сугорокова и др., 2011</b>
Шивейский	Щелочные граниты-кварцевые сиениты	297,1±3,8 293,3±3,8	U-Pb	+3,4	Сугорокова и др., 2011

Примечание. Полу жирным выделены массивы габброидов.

Note. Bold marked are massifs of gabbroids.

В последнее время получены новые результаты петрогеохимических, геохронологических и изотопных исследований пород центральной и восточной части Каахемского магматического ареала. Выявлены несколько типов габброидов и гранитоидов с очень сложными геологическими взаимоотношениями. Установлено, что в аккреционно-коллизийной и постколлизийной стадиях формирования ареала каждый этап гранитоидного магматизма предварялся базитовыми расплавами с образованием бимодальных ассоциаций – габбронориты биотитовые и гнейсомигматиты, габбронориты и кварцевые диориты [Монгуш, Сугоракова, 2013], габбронориты и щелочные гранитоиды [Сугоракова, 2008, Сугоракова и др., 2011]. Бимодальные ассоциации сопровождаются специфическими явлениями, позволяющими их опознать: проявлениями минглинга и миксинга, комбинированными дайками, однородными базитовыми включениями в гранитоидах. Описанные явления установлены на породах аккреционно-коллизийных ассоциаций возрастов 510–475 млн лет, постколлизийных ассоциаций 450 и внутриплитного магматизма 300 млн лет. Таким образом, формирование масштабного гранитообразования в коллизийных зонах происходило с участием базитовых расплавов мантийного происхождения при внутриплитных магматических процессах.

### Методика исследований

Исследования проводились в центральном и восточных районах Каахемского магматического ареала по береговым почти вертикальным обнажениям на моторных лодках и катере на воздушной подушке. Изучались гранитоиды, габброиды и дайковые комплексы, а также породы предполагаемого субстрата гранитоидов на протяжении 150 км вдоль реки М. Енисей.

U–Pb датирование цирконов осуществлялось на ионном микрозонде SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского. Построение графиков с конкордией проводилось на основе данных (табл. 2–4) с использованием программы ISOPLOT/EX [Williams et al, 1998; Ludwig, 1999].

Определение изотопного состава и Nd, а также содержаний Sm и Nd в изученных образцах проводилось в ИГЕМ РАН с применением стандартных [Журавлев и др., 1983, 1987] методик изотопного разбавления (трассеры  $^{149}\text{Sm}+^{150}\text{Nd}$  и  $^{85}\text{Rb}+^{84}\text{Sr}$ ). Измерения проведены на масс-спектрометре Sector-54. Точность определения изотопных отношений менее 0,2% для  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ , 0,002% –  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ . Средневзвешенное значение:  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  La Jolla  $0,511840 \pm 8$  (2σ, n = 14).

Определение мультиэлементного состава пород методом ICP MS проводилось в Томском государ-

ственном университете, а петрохимические исследования методом РФА – в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск).

### Полученные результаты

*Участок Тужема.* Тужеминский габброидный массив расположен в 85 км восточнее вверх по р. М. Енисей и занимает площадь около 50 кв. км. Массив представлен мелко-, средне- и крупнозернистыми габбро, габбро-диоритами и диоритами с выплавками аплитов, пегматитов. Пегматиты и аплиты мощностью от первых сантиметров до 2–3 м выполняют первичные контракционные трещины и полости. Взаимоотношения меланократовых и более лейкокатовых разностей представляют собой беспорядочное линзование габбро и диоритов без постепенных переходов, без видимых контактовых изменений. Размеры линз от нескольких сантиметров до многих метров и даже километров. В общей массе породы довольно лейкокатовые, большая часть образцов, отобранных как диориты, по результатам химических анализов попали в поле габбро с содержанием  $\text{SiO}_2$  не выше 47%. Часто для габброидов характерна гнейсовидность, пятнистость по сгущению темноцветных минералов.

По минеральному составу выделяются: биотитовые габбро, биотитовые габбронориты, нориты, биотит-амфиболовые габброиды и диориты. Габбро и нориты также содержат роговую обманку, иногда замещающую пироксен. Присутствует апатит в большом количестве, встречаются сфен, циркон, магнетит.

Химический состав габброидов достаточно выдержан:  $\text{SiO}_2$  – 46–49%,  $\text{TiO}_2$  – 1,6–2,3,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 14,6–16,8,  $\text{FeO}_{\text{общ.}}$  – 11,3–16,7,  $\text{MgO}$  – 3,7–7,  $\text{CaO}$  – 7,9–9,6,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 2,3–3,7,  $\text{K}_2\text{O}$  – 0,5–0,95,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,4–1,2%. Диориты имеют присущие им составы нормальных диоритов.

Содержания мультиэлементных компонентов, нормированные к примитивной мантии, имеют сложные спектры – отчетливые максимумы Ba, Pb и минимумы Rb, Nb–Ta, Zr–Hf, Ti. Сумма РЗЭ габброидов Тужеминского массива составляет 107–206 г/т. Спектр их распределения характеризуется достаточно высокой дифференцированностью – соотношение  $(\text{La}/\text{Yb})_n$  колеблется в пределах 4–10, среднее – 6. Спектры габброидов полностью перекрывают спектр ОИВ.

Исследованиями в ГИ КНЦ РАН (Т.Б. Баянова) установлено, что среди цирконов из пробы биотитовых габброноритов выделяются 3 морфотипа кристаллов с возрастными  $1430 \pm 5$ ,  $1215 \pm 1$  и  $500 \pm 5$  млн лет. По результатам Sm–Nd изотопных исследований установлено, что  $\epsilon\text{Nd}(T) = +6,2$ .

*Участок Большой Май–Балыктыг–Хем–Тужема.* Двуполевошпатовые граниты биотит-роговообман-

ковые между притоками р. М. Енисей Большой Май и Балыктыг-Хем (более 55 км, Балыктыгхемский массив) и Тужема–Сарыг-Чазы (более 20 км) представлены матрацевидными обнажениями. Граниты средне-крупнозернистые, светлые, биотит-рогово-обманковые гнейсоватые и массивные. Химический состав соответствует нормальному граниту –  $\text{SiO}_2$  – 67–72%, сумма щелочей – 7–8% с некоторым преобладанием  $\text{Na}_2\text{O}$ . Характеристики содержаний РЗЭ в гранитах схожи с содержаниями РЗЭ в габброидах Тужеминского массива, отличие лишь в присутствии слабого Eu-минимума. Особенностью этих гранитов является присутствие многочисленных базитовых включений округлой формы в массивных породах и линзовидной формы в гнейсоватых разностях. Размеры включений от нескольких до 20–30 см. Распределение этих включений неравномерно: могут образовывать сгущения, где на 1 м<sup>2</sup> приходится до 6–8 штук, или на километры быть равномерно рассеяны через 1–2–5 м. Иногда на протяжении нескольких километров они не попадают. Такого рода мафические включения представляют собой одно из наиболее ярких свидетельств сосуществования и взаимодействия мантийных базитовых и коровых салических расплавов – минглинговых и миксинговых процессов [Скляров, Федоровский, 2006].

По цирконам из пробы гнейсовидных биотитовых гранитов МЕ479-1 (между притоками Тужема и Сарыг-Чазы) получен U–Pb конкордантный возраст

453±3 млн лет (SHRIMP-II, ВСЕГЕИ) (табл. 2, рис. 1). Для этой же пробы получены следующие изотопные данные:  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  – 0,09292 млн лет,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  – 0,512484,  $\epsilon\text{Nd}(T)$  – +3, TDM – 843 млн лет.

Надо отметить, что все полученные данные по Sm–Nd изотопным исследованиям пород Каахемского магматического ареала дают исключительно положительные  $\epsilon\text{Nd}(T)$ .

*Участок Ужеп–Большой Май.* Меланогранитоиды, преимущественно тоналиты и кварцевые диориты, распространены западнее притока р. М. Енисей Большой Май. Опробованы гнейсовидные кварцевые диориты среднезернистые биотит-амфиболовые, типичные породы для таннуольского комплекса в междуречье Ужеп–Чадал. Их возраст определен нами U–Pb методом по циркону (SHRIMP II, ВСЕГЕИ). Полученный возраст 456±5 млн лет (табл. 3, рис. 2) соответствует постколлизийному этапу магматизма Каахемского ареала.

*Метаморфические блоки.* В центральной и восточной частях Каахемского магматического ареала присутствуют останцы докембрийских блоков – Ыдыкский блок (10 × 15 км), Агойская глыба (40 × 50 км), сложенные гнейсами и кристаллическими сланцами с мигматитами и гнейсогранитами с незначительным присутствием амфиболитов, мраморов, кварцитов. Они внешне сопоставимы с метаморфическими комплексами Западного Сангилену Тувино-Монгольского микроконтинента.

Таблица 2

Результаты U–Pb исследований зерен цирконов из двуполевошпатовых гранитов Каахемского батолита (междуречье Тужема–Сарыг-Чазы)

Table 2

The results of U–Pb studies of zircon grains from two-feldspar granites Kaakhem batholith (interfluve Tuzhema–Saryg-Chazy)

Образец, точки	% $^{206}\text{Pb}_c$	ppm U	ppm Th	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	ppm $^{206}\text{Pb}^*$	(1) $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Возраст	(1) $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ Возраст	% Dis- cor- dant	(1) $\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}^*}$	±%	(1) $\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	±%	(1) $\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	±%	(1) $\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	±%	Ко- эф. кор- рел.
МЕ479-1_8,1	0,62	68	39	0,60	3,85	408,4±6,2	473±160	16	15,29	1,6	0,0565	7,4	0,51	7,6	0,0654	1,6	0,209
МЕ479-1_1,1	0,71	252	264	1,09	15,9	452,7±5	337±130	–26	13,74	1,1	0,0532	5,6	0,534	5,8	0,07276	1,1	0,197
МЕ479-1_2,1	0,76	196	251	1,32	12,4	455,5±5,7	544±150	19	13,65	1,3	0,0584	6,6	0,589	6,8	0,07322	1,3	0,193
МЕ479-1_3,1	0,99	577	402	0,72	36,4	452,2±4,3	526±82	16	13,76	0,99	0,0579	3,7	0,58	3,9	0,07266	0,99	0,258
МЕ479-1_4,1	1,63	1188	842	0,73	75,3	451,6±4	503±60	11	13,77	0,93	0,0573	2,7	0,573	2,9	0,07257	0,93	0,321
МЕ479-1_5,1	0,48	559	270	0,50	35,1	452,9±4,2	405±57	–11	13,74	0,97	0,0548	2,5	0,55	2,7	0,07278	0,97	0,355
МЕ479-1_6,1	0,28	539	262	0,50	33,6	450,9±4,3	362±68	–20	13,8	0,98	0,0538	3	0,537	3,2	0,07245	0,98	0,310
МЕ479-1_7,1	0,34	66	75	1,17	4,17	452,5±6,5	337±140	–26	13,75	1,5	0,0532	6	0,533	6,2	0,0727	1,5	0,240
МЕ479-1_9,1	0,32	464	230	0,51	29,1	453,4±4,3	420±56	–7	13,72	0,98	0,0552	2,5	0,554	2,7	0,07287	0,98	0,364
МЕ479-1_10,1	0,23	289	209	0,75	18,1	451,4±4,6	443±77	–2	13,79	1	0,0558	3,5	0,558	3,6	0,07253	1	0,288
МЕ479-1_11,1	0,04	664	468	0,73	41	447±4,1	433±37	–3	13,93	0,95	0,05551	1,7	0,549	1,9	0,0718	0,95	0,494
МЕ479-1_12,1	0,10	1060	864	0,84	67,2	458,2±4,1	468±38	2	13,57	0,92	0,05639	1,7	0,573	1,9	0,07367	0,92	0,476
МЕ479-1_13,1	13,35	167	81	0,51	12,2	452,3±8,6	1058±340	134	13,54	2	0,075	17	0,75	17	0,0727	2	0,114

Примечание.  $\text{Pb}_c$  и  $\text{Pb}^*$  обыкновенный и радиогенный свинец соответственно. Поправка на присутствие обыкновенного свинца введена по измеренному  $^{204}\text{Pb}$ .

Note.  $\text{Pb}_c$  and  $\text{Pb}^*$  accordingly, ordinary and radiogenic lead. The correction for the presence of ordinary lead was introduced from the measured  $^{204}\text{Pb}$ .

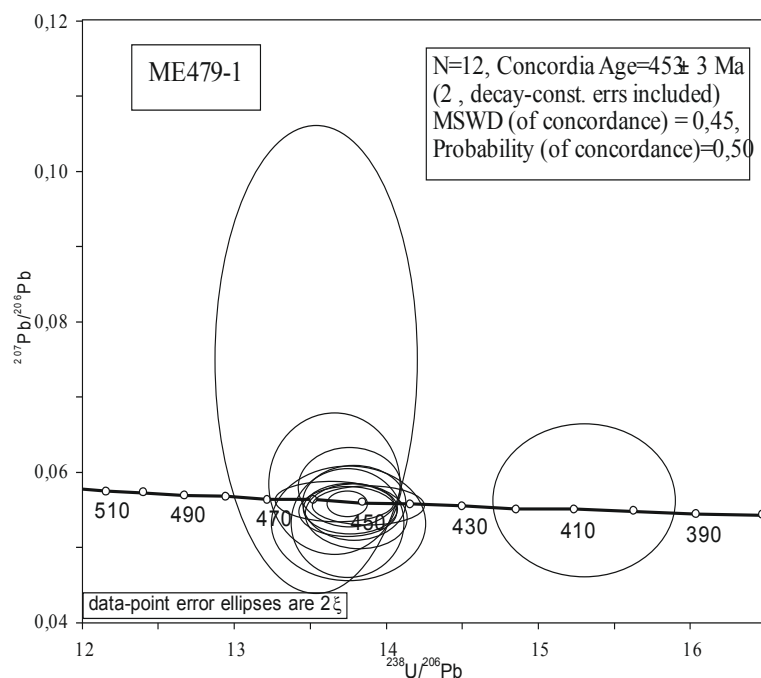


Рис. 1. U–Pb изотопная диаграмма с конкордией для цирконов из двуполевошпатовых гранитов (р. М. Енисей между притоками Тужема и Сарыг-Чазы)

Fig. 1. U–Pb isotope diagram with a concordium for zircons from two-feldspar granites (the river M. Yenisei between affluents Tuzhema and Saryg-Chazy)

Таблица 3

Результаты U–Pb исследований зерен цирконов из кварцевых диоритов Каахемского батолита (междуречье Ужеп–Чадал)

Table 3

The results of U–Pb studies of zircon grains from quartz diorites of the Kaakhem Batholith (interfluvium of Uzhep–Chadal)

Образец, точки	% $^{206}\text{Pb}_c$	ppm U	ppm Th	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	ppm $^{206}\text{Pb}^*$	(2) $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Возраст	(1) $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ Возраст	% Dis- cor- dant	Total $\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$	±%	Total $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	±%
490_1,1	1,77	315	178	0,58	20	451,4± 6,1	830±160	81	13,54	1,2	0,0703	7,1
490_2,1	5,65	128	112	0,90	8,71	464±12	1574±310	223	12,64	1,5	0,102	15
490_3,1	3,69	122	109	0,92	8,14	463,5± 6,5	1195±71	150	12,92	1,4	0,0862	2,4
490_4,1	5,38	123	93	0,79	8,26	461±11	1356±360	183	12,76	1,4	0,1	16
490_5,1	2,66	329	152	0,48	21,2	453,4± 7,1	1121±210	141	13,36	1,2	0,0776	11
490_6,1	2,99	239	110	0,47	15,4	451,9± 7	1036±190	124	13,36	1,3	0,0802	8,4
490_7,1	5,63	117	95	0,84	7,78	455±11	1549±320	224	12,9	1,4	0,102	16
490_8,1	7,56	91	55	0,62	6,18	453±13	1715±320	256	12,69	1,6	0,117	15
490_9,1	8,76	84	46	0,57	5,63	441±14	1988±300	315	12,87	1,7	0,127	16
490_10,1	4,92	150	130	0,89	9,85	451,4± 9,3	–60±1000	–113	13,11	1,4	0,096	13
490_9,1RE	8,89	89	44	0,51	6,29	464±14	–420±2700	–192	12,2	1,5	0,128	15

Примечание.  $\text{Pb}_c$  и  $\text{Pb}^*$  обыкновенный и радиогенный свинец соответственно. Поправка на присутствие обыкновенного свинца введена по измеренному  $^{204}\text{Pb}$  (1) и предполагаемому конкордантному возрасту  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  (2).

Note.  $\text{Pb}_c$  and  $\text{Pb}^*$  accordingly, ordinary and radiogenic lead. The correction for the presence of ordinary lead was introduced from the measured  $^{204}\text{Pb}$  (1) and anticipated concordant age  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  (2).

В районе Ыдыкского блока нами изучались явления ультраметаморфического преобразования вещества (гранитизация) в следующей последовательности: субстрат (гнейсы, сланцы) – мигматиты – темные мигматиты – гнейсо-гранитоиды – автохтонные

и аллохтонные гранитоиды. Кроме того, ареал формирования на юго-восточном продолжении Каахемской рифтогенной зоны, которая в венде-раннем кембрии развивалась в обстановке растяжения между континентальным склоном Тувино-Монгольского

микроконтинента и уже существующей и развивающейся в это время Таннуольско-Хамсаринской островодужной системой [Сугоракова, Бутанаев, 2014]. Поскольку коллизия каледонских структур и микроконтинента происходила позже, необходимо также

оценить вклад каледонид в состав и строение магматических комплексов ареала и собственно батолита в том числе. Это также позволит объяснить, почему одновозрастные гранитоиды Каахемского батолита отличаются по химическому и минеральному составу.

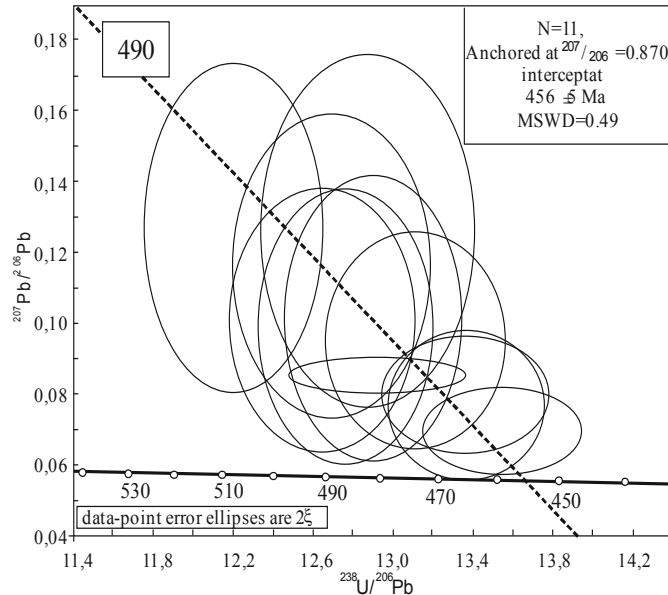


Рис. 2. U–Pb изотопная диаграмма с конкордией для цирконов из кварцевых диоритов (р. М. Енисей между притоками Ужеп и Чадал)

Fig. 2. U–Pb isotope diagram with a concordium for zircons from quartz diorites (the river M. Yenisei between affluents Uzhep and Chadal)

Таблица 4

Результаты U–Pb исследований зерен цирконов из гнейсомигматитов Каахемского батолита (район порога Бахаревский)

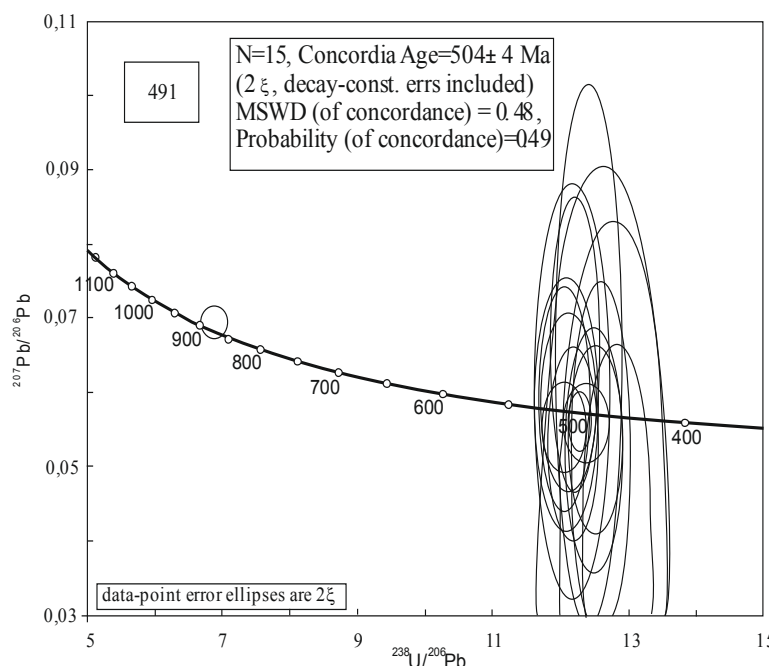
Table 4

The results of U–Pb studies of zircon grains from gneissomigmatites of the Kaakhem Batholith (near Bakharevsky rapid)

Образец, точки	% $^{206}\text{Pb}_c$	ppm U	ppm Th	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	ppm $^{206}\text{Pb}^*$	(2) $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Age	(1) $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ Age	% Dis- cor- dant	(1) $\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}^*}$	±%	(1) $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}^*}$	±%	(1) $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	±%	(1) $\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	±%	err corr
491_13,1	1,00	642	132	0,21	81	875±9,7	914±26	4	6,867	1,1	0,06952	1,3	1,395	1,7	0,1456	1,1	0,668
491_1,1	5,89	304	27	0,09	23	512,6±6,5	543±260	6	12,07	1,5	0,0584	12	0,667	12	0,0828	1,5	0,129
491_2,1	1,01	771	367	0,49	55,1	509,4±6	465±150	-9	12,18	1,2	0,0563	7	0,637	7,1	0,0821	1,2	0,174
491_3,1	7,79	103	42	0,42	7,62	494,2±7,8	-230±1000	-147	12,78	2,6	0,042	40	0,45	40	0,0782	2,6	0,064
491_4,1	9,69	305	7	0,02	23,7	504,8±6,6	-750±1900	-253	12,62	3,1	0,034	68	0,38	68	0,0792	3,1	0,045
491_5,1	2,00	360	52	0,15	26	510±6,7	750±140	46	12,05	1,3	0,0642	6,4	0,735	6,6	0,083	1,3	0,191
491_6,1	2,22	390	5	0,01	28,2	510,1±6,7	599±160	17	12,11	1,3	0,0599	7,3	0,682	7,4	0,0826	1,3	0,172
491_7,1	2,95	265	5	0,02	19,1	504±8,3	705±310	39	12,21	1,3	0,0629	15	0,71	15	0,0819	1,3	0,089
491_8,1	4,10	176	188	1,11	12,9	507±12	619±410	21	12,17	1,9	0,06	19	0,68	19	0,0822	1,9	0,102
491_9,1	####	221	9	0,04	17,1	495±10	770±480	54	12,41	1,6	0,065	23	0,72	23	0,0806	1,6	0,069
491_10,1	1,70	1217	55	0,05	88,7	516,7±5,8	327±150	-36	12,05	1,2	0,0529	6,7	0,606	6,8	0,08298	1,2	0,175
491_11,1	1,35	706	395	0,58	49,4	497,9± 6,1	356±220	-28	12,51	1,3	0,0537	9,8	0,591	9,9	0,08	1,3	0,128
491_12,1	0,99	712	6	0,01	49,7	499,3±6	301±300	-39	12,49	1,4	0,0523	13	0,578	13	0,0801	1,4	0,103
491_14,1	0,73	1770	116	0,07	124	501,7±5,5	458±87	-9	12,37	1,1	0,0561	3,9	0,626	4,1	0,08082	1,1	0,278
491_15,1	3,54	258	9	0,04	18,4	496,7±8,5	250±450	-49	12,58	1,4	0,0512	19	0,56	19	0,0795	1,4	0,073
491_16,1	4,24	254	9	0,04	18,2	494,6±8,7	-505±820	-205	12,84	1,6	0,038	31	0,41	31	0,0779	1,6	0,052

Примечание.  $\text{Pb}_c$  и  $\text{Pb}^*$  обыкновенный и радиогенный свинец соответственно. Поправка на присутствие обыкновенного свинца введена по измеренному  $^{204}\text{Pb}$  (1) и предполагаемому конкордантному возрасту  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  (2).

Note.  $\text{Pb}_c$  and  $\text{Pb}^*$  accordingly, ordinary and radiogenic lead. The correction for the presence of ordinary lead was introduced from the measured  $^{204}\text{Pb}$  (1) and anticipated concordant age  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  (2).



**Рис. 3. U–Pb изотопная диаграмма с конкордией для цирконов из гнейсомигматитов (р. М. Енисей, район порога Бахаревский)**

**Fig. 3. U–Pb isotope diagram with a concordium for zircons from gneissomigmatites (river M. Yenisei, near Bakharevsky rapid)**

В 2015 г. проведено опробование пород предполагаемого субстрата Каахемского ареала – Агойской глыбы, Ыдыкского блока и вулкангенно-терригенного разреза Каахемской офиолитовой зоны. В настоящее время проводятся изотопно-геохимические исследования этих проб. По цирконам из меланократовых гнейсомигматитов Агойской глыбы получен U–Pb конкордантный возраст  $504 \pm 4$  млн лет (метод, SHRIMP-II, ВСЕГЕИ) (см. табл. 4, рис. 3).

*Участок Балыктыг-Хем–Янзели.* Расположен между Агойской глыбой метаморфических пород и Балыктыгхемским гранитным массивом. Участок сложен переплетением пачек метаморфических пород, даек базитов и аплитов и комбинированных даек. Комбинированные дайки присутствуют как среди метаморфических толщ, так и в гранитах. На территории Агойской глыбы рои комбинированных даек протягиваются на километры. Иногда такие рои комбинированных даек напоминают апикальные части гранитного массива, проникающего в более ранний базитовый массив наподобие сети. Такую вероятность также нельзя отбрасывать.

Также обнаружены рои комбинированных даек базит-аплитового состава ниже устья р. Балыктыг-Хем. На островах р. М. Енисей среди двуполевошпатовых гранитов наблюдается магматическое тело, состоящее из 6 вертикальных базитовых даек, перемежающихся с мелкозернистыми гранитами. Это тело на севере обрывается в реку, а на юге контакти-

рует со среднезернистыми двуполевошпатовыми гранитами. Мощность базитовых участков до 1 м, кислых участков – от первых сантиметров до 0,5 м. Контакты крайне извилистые, фестончатые. Это тело также можно толковать как тело, сложенное контрастной магматической смесью – будинированные тела базитов в гранитной матрице. Доля гранитов не превышает 30% от общего объема.

### Обсуждение результатов и заключение

*Геодинамическая природа.* Как видно из табл. 1, в составе Каахемского магматического ареала в интервале от позднего венда – раннего кембрия до ранней перми принимают участие гетерогенные по вещественному составу и геодинамической природе магматические образования. Наиболее ранние ассоциации (563–535 млн лет) островодужного толеитового ряда имеют признаки, характерные для надсубдукционных источников, которые типичны для плагиогранитоидов поздневендских офиолитов и венд-раннекембрийских аккреционно-островодужных сооружений Центральной Азии, формирующихся за счет метабазитовых субстратов, близких к N-MORB-типу [Руднев и др., 2006, 2015].

На рубеже кембрия и ордовика произошла кардинальная перестройка магматических систем, которая сначала выразилась в появлении гранитоидов монзонитоидного ряда (зубовский комплекс, массив

Тужема с плюмовыми метками). Это привело к первому эпизоду масштабного магмообразования, сопровождавшегося выплавлением пикритоидных магм, приведших к формированию многочисленных расслоенных габброидных массивов (мажалыкский комплекс) и андезитоидных и К-андезитоидных магм, отражающих последовательное разрастание очага и вовлечение в плавление крупных объемов ювенильной раннекаледонской коры (484–473 млн лет). Хотя к этому времени коллизионный метаморфизм в Тувино-Монгольском массиве уже завершился, геодинамическая природа гранитоидов этого этапа дискуссионна, но в любом случае необходимо предполагать существование крупного мантийного источника, инициировавшего масштабное переплавление нижней коры.

Следующий (наиболее масштабный) эпизод гранитообразования охватил интервал от 455 до 445 млн лет после перерыва в 20 млн лет. Он также начался с пикритоидных расплавов (Шуйский массив), но главным образом выразился в повторном выплавлении крупных объемов андезитоидных и К-андезитоидных магм, «спаявших» более ранние реликты, останцы и массивы в Каахемском магматическом ареале и придавших ему облик единого мегабатолита на современном эрозионном срезе. Пульсационный характер магматизма, отразившийся в повторении ряда «пикритоиды – андезитоиды – К-андезитоиды», предполагает единый механизм батолитообразования. По мнению авторов, этот механизм обусловлен одновременным действием двух факторов: 1) длительным существованием мантийного очага, подпитывающего головой плюма (модель андерплейтинга), 2) неоднократным вскрытием кровли этого очага в результате возобновления активности трансформных сдвигов вдоль окраины Сибирского континента (Западно-Кордильерская геодинамическая обстановка).

Еще один внутриплитный этап гранитообразования связан с мантийным плюмом, существовавшим около 300 млн лет назад. Формировались массивы бимодальной ассоциации «габброиды и щелочные гранитоиды». В их числе изученные нами ранее массивы – Шивейский щелочногранитоидный и габброидный Чадалский [Сугоракова, 2008; Сугоракова и др., 2011] (см. табл. 1).

Эти ассоциации, хоть и расположены на территории Каахемского ареала, являются частью позднепалеозойской Восточно-Саянской щелочногранитоидной провинции.

*Магмообразующие источники.* По Nd изотопным характеристикам гранитоиды, участвующие в формировании Каахемского ареала, могут быть разделены на четыре группы, фиксирующие смену магмообразующих источников. К первой группе относятся толеитовые плагиогранитоиды островодужного этапа, характеризующиеся высокими отношениями  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  (0,21–0,23) и имеющие  $\epsilon\text{Nd}(T) = +6,5 \dots +6,4$ , близкие к деплетированной мантии [Руднев и др., 2006]. Основным источником для их формирования, вероятнее всего, служили породы океанического основания островной дуги, сложенные преимущественно базальтами N-MORB-типа. Ко второй группе относятся известково-щелочные плагиогранитоиды, характеризующиеся  $\epsilon\text{Nd}(T) = +3,9 \dots +5,7$  и  $T_{\text{Nd}}(\text{DM-2st}) = 0,9–0,92$  млрд лет. Такие модельные возрасты типичны для гранитоидов ранних каледонид Центральной Азии и отражают формирование гранитоидных магм за счет ювенильной континентальной коры позднерифейского возраста. К третьей группе относятся интрузивные образования зубовского, сархойского (двуполевошпатовые гранитоиды) и щелочные гранитоиды, характеризующиеся минимальными среди пород Каахемского батолита значениями  $\epsilon\text{Nd}(T) = +0,4 \dots +4,8$  и предельными модельными возрастными протолитов  $T_{\text{Nd}}(\text{DM-2st}) = 0,96–1,06$  млрд лет. Такие изотопные характеристики могут быть следствием участия в генерации гранитоидов наряду с породами позднерифейской коры, дорифейских коровых субстратов, аналогичных слагающим основание Тувино-Монгольского микроконтинента, на что указывает наличие древней компоненты в изученных цирконах пород данных комплексов. С другой стороны, учитывая повышенную щелочность пород (в первую очередь, зубовского комплекса и щелочных гранитоидов), эти изотопные характеристики объясняются следствием вклада в генерацию гранитоидных магм плюмового источника.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-05-00181, 16-05-00255).*

## ЛИТЕРАТУРА

- Бородин Е.В., Егорова В.В., Изох А.Э. Петрология ордовикских коллизионных перидотит-габбровых массивов (на примере мажалыкского интрузива, Юго-Восточная Тува) // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 9. С. 1075–1091.
- Гусев Н.И., Суфиев А.А. Интрузивные образования западной части Каахемского ареала-плутона и медно-порфировое оруденение Тувы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы совещ. Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2017. Вып. 15. С. 76–78.
- Журавлев А.З., Журавлев Д.З., Костицын Ю.А., Чернышев И.В. Определение самарий-неодимового отношения для целей геохронологии // Геохимия. 1987. № 8. С. 1115–1129.
- Журавлев Д.З., Чернышев И.В., Агапова А.А., Сердюк Н.И. Прецизионный изотопный анализ неодима в горных породах // Известия АН СССР. Сер. геол. 1983. № 12. С. 23–40.



**Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Коваленко В.И., Котов А.Б., Лебедев В.И., Сугорокова А.М.** Возраст постколлизийного магматизма ранних каледонид Центральной Азии (на примере Тувы) // Доклады Академии наук. 1998. Т. 360, № 4. С. 514–517.

**Козаков И.К., Ковач В.П., Ярмолюк В.В., Котов, А.Б., Сальникова Е.Б., Загорная Н.Ю.** Корообразующие процессы в геологическом развитии Тувино-Монгольского массива: Sm–Nd изотопные геохимические данные по гранитоидам // Петрология. 2003. Т. 11, № 5. С. 491–511.

**Монгуш А.А., Сугорокова А.М.** Возраст и источники магм постколлизийных габброидов Каахемского магматического ареала, Восточная Тува: результаты первых  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  и Sm–Nd исследований // Геохимия. 2013. № 11. С. 1042–1047.

**Руднев С.Н., Владимиров А.Г., Пономарчук В.А. и др.** Каахемский полихронный гранитоидный батолит (В. Тува): состав, возрасты, источники и геодинамическая позиция // Литосфера. 2006. № 1. С. 30–42.

**Руднев С.Н.** Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны Западной Монголии. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. 300 с.

**Руднев С.Н., Серов П.А., Киселева В.Ю.** Венд-раннепалеозойский гранитоидный магматизм Восточной Тувы // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 9. С. 1572–1600.

**Сальникова Е.Б., Козаков И.К., Ковач В.П. и др.** Раннеордовикский возраст мажалькского комплекса Восточной Тувы: U–Pb метод по циркону // Материалы совещания «Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза» СПб. : Центр информ. культуры, 2003. С. 450–452.

**Склярёв Е.В., Федоровский В.С.** Тектонические и геодинамические аспекты механического смешения магм (магматического минглинга) // Геотектоника. 2005. № 2. С. 47–64.

**Сугорокова А.М., Монгуш А.А.** Позднеордовикская вулканоплутоническая ассоциация Восточной Тувы: геолого-петрографические и петрохимические особенности // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещ. Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2008. Вып. 6, т. 2. С. 117–118.

**Сугорокова А.М., Монгуш А.А.** Позднеордовикская гранитоидно-игнибритовая вулканоплутоническая ассоциация в Каахемском магматическом ареале (Восточная Тува) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещ. Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2012. Вып. 10, т. 2. С. 109–110.

**Сугорокова А.М.** К вопросу о возрасте гранитоидного брельского комплекса // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещ. Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2007. Вып. 5, т. 2. С. 105–106.

**Сугорокова А.М.** Особенности контакта Чадалского габброидного и Шивейского щелочного гранит-кварцевосиенитового массивов (Восточная Тува) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещ. Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2008. Вып. 6, т. 2. С. 115–116.

**Сугорокова А.М.** О синхронности формирования гранитоид-игнибритовой ассоциации в Каахемском магматическом ареале (Восточная Тува) // Граниты и эволюция Земли: граниты и континентальная кора : материалы II междунар. геол. конф. (17–20 авг. 2014 г., Новосибирск, Россия). Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. С. 194–195.

**Сугорокова А.М.** Брельская синхронная вулканоплутоническая ассоциация (Каахемский магматический ареал, Восточная Тува) // Петрология магматических и метаморфических комплексов : VIII Всерос. петрограф. конф. с междунар. участием (28 ноября – 3 декабря 2016 г., ТГУ). Томск, 2016. С. 292–296.

**Сугорокова А.М., Ярмолюк В.В., Лебедев В.И., Лыхин Д.А.** Позднепалеозойский щелочногранитоидный магматизм Тувы и его связь с внутриплитными процессами в пределах Сибирского палеоконтинента // Доклады Академии наук. 2011. Т. 439, № 5. С. 641–647.

**Сугорокова А.М., Бутанаев Ю.В.** Каахемская рифтогенная зона (история заложения и развития) // Тувинские землетрясения 2011–2012 гг. : материалы науч. совещ. по Базовому проекту ТуВИКОПР СО РАН VII78.1.4 «Напряженное состояние сейсмоопасных зон Тувы: оценка сейсмической безопасности на основе сейсмологических исследований и данных сети сейсмических станций» (15–17.04.2014 г. Кызыл, Россия). Кызыл : ТуВИКОПР СО РАН, 2014. С. 83–85.

**Сугорокова А.М.** Новые геохронологические и изотопные данные к вопросу о возрасте ассоциаций Каахемского магматического ареала (Восточная Тува) // Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию ТуВИКОПР СО РАН (14–15.10.2015, г. Кызыл, Россия). Кызыл : ТуВИКОПР СО РАН, 2015. С. 166–168.

**Ludwig K.R.** Berkeley Geochronology Center Special Publication. 1999. № 1a. 49 p.

**Williams I.S.** Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes / eds by M.A. McKibben, W.C. Shanks III, W.I. Ridley // Reviews in Economic Geology. 1998. V. 7. P. 1–35.

#### Авторы:

**Сугорокова Амина Мидхатовна**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.

E-mail: samina51@inbox.ru

**Хертек Айлан Кымзай-ооловна**, инженер-исследователь, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.

E-mail: ajlan@mail.ru

A.M. Sugorakova, A.K. Khertek

Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, SB RAS, Kyzyl, Russia

## THE NEW DATA TO THE QUESTION OF THE AGE OF ASSOCIATIONS KAAKHEM MAGMATIC AREA (EASTERN TUVA)

The table reflects all currently known geochronological and Sm-Nd isotopic data for Kaakhem magmatic areal. Stage island arc granitoid magmatism preceded and accompanied by basalt-andesite-rhyolite volcanism. Accretion-collisional granitoid magmatism begins with the introduction of the gabbroid massifs of elevated alkalinity with intraplate characteristics, which reflect the existence of the Altai-Sayan hot spot of the mantle (mantle plumes). In the time interval from 512 to 474 Ma known 3 of the level of gabbroid and 6 granitoid magmatism that means virtually continuous process of granite formation. The majority of these granitoids are located in the West of the area.

After a hiatus of 20 Ma in the interval 455–445 Ma, comes the next main stage of granite post-collisional, also preceded by the formation of gabbroids with intraplate labels. Granitoids of this stage is gneissosity melanogranitoides and two-feldspar granitoids. They occupy a space of hundreds of kilometers and put the main part Kaakhem area. The differences in their chemical composition during the formation of synchrony reflect the characteristics of the composition of the substrate, of which smelted granitoid magma. This stage is also characterized by the simultaneous manifestation of volcanism with ignimbritic type eruptions.

Added more new geochronological (U-Pb, MA) and isotopic ( $\epsilon\text{Nd(T)}$ ) data: Togema (gabbro) –  $500 \pm 10$ ,  $+6,2$ ; Bakharevskii rapids (gneiss-migmatite) –  $504 \pm 4$  Ma; Uzhep-Chadal (quartz diorite) –  $456 \pm 5$  Ma; Saryg-Chazy (two-feldspar granites) –  $453 \pm 3$ ,  $+3,0$  Ma.

**Keywords:** Eastern Tuva, Kaakhem magmatic area, granite formation, gabbroids.

## REFERENCES

- Borodina E.V., Egorova V.V., Izokh A.E. Petrology of Ordovician Collision-related Layered peridotite-gabbro intrusions (exemplified by the Mazhalyk intrusion, Southeastern Tuva) // Russian Geology and Geophysics. 2004. T. 45. № 9. pp. 1025.
- Gusev N.I., Sufiev A. A. *Intruzivnye obrazovaniya zapadnoy chasti Kaakhemskogo areal-plutona i medno-porfirovoye orudenenie Tuvy* [The Intrusive formation of the Western part Kaakhem areal-pluton and porphyry copper-gold mineralization of Tuva] // Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya. 2017. pp. 76–78. In Russian
- Zhuravlev A.Z., Zhuravlev D.Z., Kostitsyn Y.A., Chernyshev I.V. Determination of samarium-neodymium relationship for the purposes of geochronology // Geochemistry International. 1987. № 8. pp. 1115–1129.
- Zhuravlev D.Z., Chernyshev I.V., Agapova A.A., Serdyuk N.I. *Pretsizionnyy izotopnyy analiz neodima v gornyykh porodakh* [Precision isotopic analysis of neodymium in rocks] // Izv. AN SSSR. Ser. geol. 1983. № 12. pp. 23–40. In Russian
- Kozakov I.K., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Kovalenko V.I., Lebedev V.I., Sugorakova A.M., Yakovleva S.Z. The age of postcollisional magmatism in the Early Caledonides of Central Asia, with the Tuva region as an example // Doklady Earth Sciences. 1998. T. 360. № 4. pp. 510–513.
- Kozakov I.K., Kovach V.P., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B., Salnikova E.B., Zagornaya N.Yu. Crust formation in the geologic development of the Tuva-Mongolia massif: Sm-Nd isotope geochemical data after granitoides // Petrology. 2003. T. 11. № 5. pp. 491–511.
- Mongush A.A., Sugorakova A.M. Age and magma sources collisional gabbroids of the Kaakhem magmatic area, Eastern Tuva: first  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and Sm-Nd data // Geochemistry International. 2013. T. 51. № 11. pp. 939–943.
- Rudnev S.N., Vladimirov A.G., Ponomarchuk V.A. i dr. *Kaakhemskiy polikhronnyy granitoidnyy batolit (V.Tuva): sostav, vozrasty, istochniki i geodinamicheskaya pozitsiya* [Kaachem polychronous granitoid batholith (V. Tuva): composition, ages, sources and geodynamic position] // Litosfera. 2006. № 1. pp. 30–42. In Russian
- Rudnev S.N. *Rannepaleozoyskiy granitoidnyy magmatizm Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti i Ozerney zoy Zapadnoy Mongolii*. [Early Paleozoic granitoid magmatism of the Altai-Sayan folded region and the Lake Zone of Western Mongolia]. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN. 2013. 300 p. In Russian
- Rudnev S.N., Kiseleva V.Y., Serov P.A. Vendian - Early Paleozoic Granitoid Magmatism in Eastern Tuva // Russian Geology and Geophysics. 2015. T. 56. № 9. pp. 1232–1255.
- Sal'nikova E.B., Kozakov I.K., Kovach V.P. i dr. *Ranneordovikiy vozrast mazhalykskogo kompleksa Vostochnoy Tuvy: U-Pb metod po tsirkonu* [Early Ordovician age of the Mazhalyk complex in Eastern Tuva: U-Pb zircon method] // Materialy soveshchaniya «Izotopnaya geokhronologiya v reshenii problem geodinamiki i rudogeneza» SPb: Tsentr informatsionnoy kul'tury. 2003. pp. 450–452. In Russian
- Sklyarov E.V., Fedorovskii V.S. Magma Mingling: Tectonic and Geodynamic Implications // Geotectonics. 2006. № 2. pp. 120–134.
- Sugorakova A.M. *K voprosu o vozraste granitoidnogo bren'skogo kompleksa* [On the age of the granitoid Bran complex] // Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya. Vyp. 5. Irkutsk: Institut zemnoy kory SO RAN. 2007. V 2-kh tomakh. T. 2. pp. 105–106. In Russian
- Sugorakova A.M., Mongush A.A. *Pozdneordovikskaya vulkanoplutonicheskaya assotsiatsiya Vostochnoy Tuvy: geologo-petrograficheskie i petrokhimicheskie osobennosti* [Late Ordovician volcanoplutonic association of Eastern Tuva: geological-petrographic and petrochemical features] // Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya. Vyp. 6. Irkutsk: Institut zemnoy kory SO RAN. 2008. V 2-kh tomakh. T. 2. pp. 117–118. In Russian

Sugorakova A.M., Mongush A.A. *Pozdneordovikskaya granitoidno-ignimbritovaya vulkanoplutonicheskaya assotsiatsiya v Kaakhemskom magmaticheskom areale (Vostochnaya Tuva)* [Late Ordovician Granitoid-ignimbrite volcanoplutonic association in the Kaakhem magmatic area (Eastern Tuva)] // *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya*. Vyp. 10. Irkutsk: Institut zemnoy kory SO RAN. 2012. V 2-kh tomakh. T. 2. pp. 109–110. In Russian

Sugorakova A.M. *Bren'skaya sinkhronnaya vulkanoplutonicheskaya assotsiatsiya (Kaakhemskiy magmaticheskiy areal, Vostochnaya Tuva)* [Brainsk Synchronous Vulcanoplutonic Association (Kaakhem Magmatic Areal, Eastern Tuva)] // *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov / VIII Vserossiyskaya petrograficheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* (28 noyabrya-3 dekabrya 2016 g., TGU. Tomsk). 2016. pp. 292–296. In Russian

Sugorakova A.M. *O sinkhronnosti formirovaniya granitoid-ignimbritovoy assotsiatsii v Kaakhemskom magmaticheskom areale (Vostochnaya Tuva)* [On the synchronicity of the formation of the granitoid-ignimbrite association in the Kaakhem magmatic area (Eastern Tuva)] // *Granity i evolyutsiya Zemli: granity i kontinental'naya kora: Materialy II mezhdunarodnoy geologicheskoy konferentsii*, 17–20 avg. 2014 g., Novosibirsk, Rossiya. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN. 2014. pp. 194–195. In Russian

Sugorakova A.M. *Osobennosti kontakta Chadalskogo gabbroidnogo i Shiveyskogo shchelochnogo granit-kvartsevosienitovogo massivov (Vostochnaya Tuva)* [Peculiarities of the contact between the Chadal gabbroid and Shiwei alkaline granite-quartz-syenite massifs (Eastern Tuva)] // *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya*. Vyp. 6. Irkutsk: Institut zemnoy kory SO RAN. 2008. V 2-kh tomakh. T. 2. pp. 115–116. In Russian.

Sugorakova A.M., Lebedev V.I., Yarmolyuk V.V., Lykhin D.A. Late palaeozoic alkali-granitic magmatism of Tuva and its relation to intraplate activity within the Siberian paleocontinent // *Doklady Earth sciences*. 2011. T. 439. № 2. pp. 1070–1075.

Sugorakova A.M., Butanaev Yu.V. *Kaakhemskaya riftogennaya zona (istoriya zalozheniya i razvitiya)* [Kaachem rift zone (history of location and development)] // *Tuvinskie zemletryaseniya 2011-2012 gg. Materialy nauchnogo Soveshchaniya po Bazovomu proektu TuvIKOPR SO RAN VIII78.1.4 «Napryazhennoe sostoyanie seysmopasnykh zon Tuvy: otsenka seysmicheskoy bezopasnosti na osnovе seysmologicheskikh issledovaniy i dannykh seti seysmicheskikh stantsiy»* (15–17.04.2014 g. Kyzyl, Rossiya). Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN. 2014. pp. 83–85. In Russian.

Sugorakova A.M. *Novyye geokhronologicheskiye i izotopnyye dannyye k voprosu o vozraste assotsiatsiy Kaakhemskogo magmaticheskogo areala (Vostochnaya Tuva)* [New geochronological and isotopic data on the age of associations of the Kaakhemsky magmatic range (Eastern Tuva)] // *Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 20-letiyu TuvIKOPR SO RAN* (14–15.10.2015, g. Kyzyl, Rossiya). Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN. 2015. pp. 166–168. In Russian.

Ludwig K.R. // *Berkeley Geochronology Center Special Publication*. 1999. № 1a, 49 p.

Williams I.S. In: McKibben, M.A., Shanks III, W.C. and Ridley, W.I. (eds), *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes*, *Reviews in Economic Geology*. 1998. V. 7. pp. 1–35.

#### Authors:

**Sugorakova Amina Midkhatovna**, Cand. Sci.(Geol.-Miner), Leading Scientific Collaborator, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, SB RAS, Kyzyl, Russia

E-mail: samina51@inbox.ru

**Khertek Aylan Kymzay-oolovna**, Engineer-researcher, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources, SB of the Ras, Kyzyl, Russia

E-mail: ajlan@mail.ru