

U–Pb ИЗОТОПНОЕ ДАТИРОВАНИЕ ЦИРКОНОВ ИЗ PZ₃–MZ МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЗАБАЙКАЛЯ МЕТОДОМ МАГНИТНО-СЕКТОРНОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ С ЛАЗЕРНЫМ ПРОБООТБОРОМ: ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОПОСТАВЛЕНИЕ С SHRIMP ДАННЫМИ

В.Б. Хубанов^{1,2}, М.Д. Буянтуев¹, А.А. Цыганков^{1,2}

¹ Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия

² Бурятский государственный университет, 670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а, Россия

U–Pb изотопное датирование цирконов с помощью лазерной абляции и магнитно-секторной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (LA–SF–ICP–MS) представляется доступным и простым в пробоподготовке локальным методом. В ГИН СО РАН метод реализован на базе однокolleкторного магнитно-секторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Element XR (Thermo Scientific) и установки для лазерной абляции UP-213 (New Wave Research). На примере измерения эталонных цирконов показано, что погрешность определения возраста составляет менее 2 %. Результаты U–Pb изотопного LA–SF–ICP–MS датирования цирконов из позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья подтверждают возрастное перекрытие времени формирования баргузинского (330—290 млн лет), чивыркуйского (305—285 млн лет) и зазинского (305—285 млн лет) интрузивных комплексов.

U–Pb изотопное датирование, LA–SF–ICP–MS, гранитоиды, Забайкалье.

U–Pb DATING OF ZIRCONS FROM PZ₃–MZ IGNEOUS COMPLEXES OF TRANSBAIKALIA BY SECTOR-FIELD MASS SPECTROMETRY WITH LASER SAMPLING: TECHNIQUE AND COMPARISON WITH SHRIMP

V.B. Khubanov, M.D. Buyantuev, and A.A. Tsygankov

U–Pb zircon dating by laser ablation and sector-field mass spectrometry with inductively coupled plasma (LA–SF–ICP–MS) is an accessible local method with easy sample preparation. At the Geological Institute, Ulan-Ude, this method was applied using a Thermo Scientific Element XR single-collector SF ICP mass spectrometer and a UP-213 (New Wave Research) laser ablation system. Measurements for standard zircons showed the error of dating less than 2%. The results of LA–SF–ICP–MS U–Pb dating of zircons from Late Paleozoic granitoids of western Transbaikalia confirm the overlapping of the time intervals of formation of the Barguzin (330–290 Ma), Chivyrkui (305–285 Ma), and Zaza (305–285 Ma) intrusive complexes.

U–Pb zircon dating, LA–SF–ICP–MS, granitoids, Transbaikalia, Russia

ВВЕДЕНИЕ

U–Pb изотопное датирование урансодержащих минеральных фаз является одним из наиболее важных методов геохронологии, главным образом благодаря возможности расчета возраста по нескольким системам изотопных отношений, что значительно повышает достоверность возрастных определений [Фор, 1989]. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерным прободотбором (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, LA–ICP–MS) представляется наиболее доступным и простым в пробоподготовке методом для U–Pb изотопно-геохронологических исследований. Он обладает высокой пропускной способностью, а по пространственному разрешению (диаметр анализируемой поверхности 15—40 мкм) и точности ненамного уступает ионному зонду с масс-спектрометрией вторичных ионов (Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS).

LA–ICP–MS системы преимущественно базируются на коротко-волновых твердотельных лазерах и квадрупольных (Quadrupole) масс-спектрометрах с индуктивно связанной плазмой (LA–Q–ICP–MS). Такая приборная конфигурация широко применяется для датирования цирконов различного возраста [Feng et al., 1993; Fryer et al., 1993; Li et al., 2001; Jackson et al., 2004]. Альтернативой им являются системы, основанные на аналогичных лазерах и магнитно-секторных (Sector Field) масс-спектрометрах с индуктивно связанной плазмой (LA–SF–ICP–MS) [Tierpolo, 2003; Frei, Gerdes, 2009; Костицын, Аносова, 2013]. Однако в литературе наблюдается существенное доминирование геохронологических данных,

полученных с помощью LA-Q-ICP-MS, тогда как определения возраста посредством LA-SF-ICP-MS немногочисленны. Вероятно, это обусловлено недооценкой исследователями возможностей второго метода и небольшим количеством лабораторий, специализирующихся в этом направлении.

В настоящем сообщении на примере определения возраста международных эталонных цирконов и цирконов из датированных позднепалеозойских гранитоидов и мезозойских карбонатитов Забайкалья приведены результаты апробации U-Pb изотопного LA-SF-ICP-MS метода, параметры настройки и адаптации оборудования, процедуры анализа и расчета возраста. Кроме того, получены новые датировки для гранитоидов баргузинского, чивыркуйского и нижнеселенгинского комплексов Забайкалья.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Определения U-Pb изотопного возраста цирконов методом LA-SF-ICP-MS проводились в лаборатории физических методов анализа Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института Сибирского отделения РАН, г. Улан-Удэ.

Устройство лазерной абляции. Принципиальная схема системы магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором отображена на рис. 1. Лазерный пробоотбор проводился с помощью устройства лазерной абляции UP-213, фирмы New Wave Research. Физические параметры лазера, подобранные для анализа, приведены в табл. 1. Диаметр лазерного луча составлял 30—40 мкм, при этом плотность энергии лазерного излучения составляла около 3.5 Дж/см². Общее время свечения лазера — 55 с, в течение первых 25 с лазер накачивался до номинальной мощности при закрытой заслонке. Испарение образцов проводилось в камере лазерного пробоотбора типа Super Cell. В камеру вместе с исследуемым препаратом для уменьшения внутреннего объема помещалась полимерная вставка (см. рис. 1). Кроме того, была упрощена система подачи и отвода пробонесущего газа — исключены распределители газового потока и укорочена длина газовой трубки, соединяющей камеру лазерного пробоотбора и систему ионизации в индуктивно связанной плазме (ICP), до 1 м. Подобное усовершенствование позволило обеспечить более полный перенос транспортирующим газом испаренного вещества и, соответственно, улучшить интенсивность и стабильность аналитического сигнала.

В качестве среды-переносчика испаренного вещества использовался поток газа гелия (чистота не менее 99.99 %), который перед системой индуктивно связанной плазмы смешивали с аргоном (чистота 99.998 %) через T-образный тройник.

Магнитно-секторный масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой. Изотопный анализ вещества цирконов, испаренного лазером, проводился на одноколлекторном магнитно-секторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Element XR, фирмы Thermo Scientific. Особенностью данного типа масс-спектрометров является двойная фокусировка ионного пучка — разделение ионов по отношению массы к заряду в магнитном поле и по кинетической энергии в электростатическом поле, — которая позволяет избавиться от ряда интерференционных влияний, достичь лучшей стабильности ана-

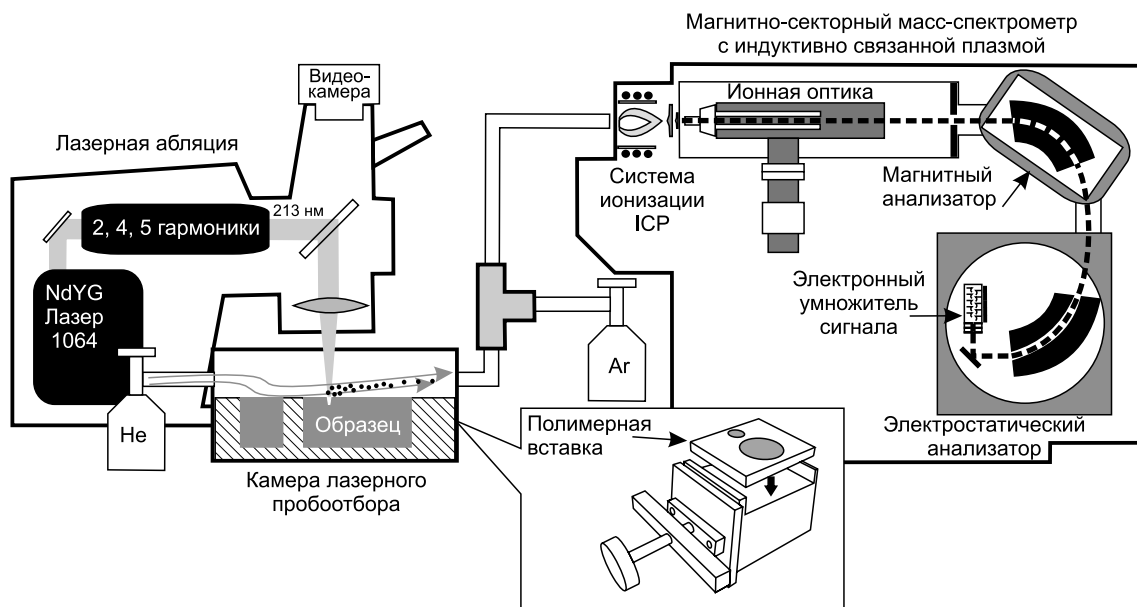


Рис. 1. Принципиальная схема системы лазерной абляции UP-213 и магнитно-секторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Element XR.

Таблица 1. Параметры настроек оборудования LA-SF-ICP-MS для U-Pb изотопного датирования цирконов

Лазерная абляция	
Тип лазера	Nd-YAG
Производитель / модель	New Wave Research / UP-213
Длина волны излучения	213 нм
Размер пучка излучения	30—40 мкм
Частота импульсов	10 Гц
Уровень выхода энергии	45—50 %
Мощность ВЧ генератора	~0.025 мДж
Плотность потока энергии	~3.5 Дж/см ²
Масс-спектрометр	
Тип масс-спектрометра	Магнитно-секторный
Производитель / модель	Thermo Scientific / Element XR
Энергия ионизации	1000—1150 Вг
Газовые потоки:	
Охлаждающий (Ar)	16 л/мин
Вспомогательный (Ar)	1 л/мин
Транспортный (He)	0.9—1.2 л/мин
Пробоподающий (Ar)	0.9—1.2 л/мин
Разрешение	Низкое
Режим сканирования	E-scan
Мертвое время детектора	15 нс
Время измерения фонового сигнала и разогрева лазера	25 с
Время лазерного испарения и измерения сигнала пробы	30 с
Метод измерения:	
Измеряемые массы (изотопы)	202, 204, 206, 207, 208, 232, 235, 238
Режим регистрации сигналов	Аналоговый режим — для массы 238 Режим счета — для других масс
Окно сканирования массы	5 % — для 202 и 204; 7 % — 232 и 238; 8 % — 206, 207, 208 и 235 масс
Время задержки магнита	0.001 с для каждой массы
Время измерения	0.001 с для каждой массы
Количество сигналов в пике	120 — для 207 массы и 100 — для других масс
Способ интегрирования сигнала	Среднеарифметический
Количество сканирований при одном измерении	1000

литического сигнала и более высоких пределов обнаружения относительно приборов с квадрупольной архитектурой [Moens, Jakubowski, 1998; Tierpolo, 2003].

Для ионизации вещества использовалась типовая кварцевая горелка с кварцевым распылителем с диаметром 1.7 мм и алюминиевые пробоотборный и скиммерный конусы. Физические параметры масс-спектрометра, такие как пространственное положение плазмообразующей горелки, значения напряжений на индукционную катушку, элементы ионной оптики, электронный множитель сигнала и др., настраивались согласно рекомендациям [Frei, Gerdes, 2009]. Измерение аналитического сигнала проводилось в скоростном режиме электростатического сканирования (E-scan). Диапазон масс непрерывного E-scan сканирования составлял 30 % от значения наименьшей атомной массы, на которой стабилизировалась позиция магнита, что позволяло производить съемку от 202 по 238 массы в единой автоматически настроенном режиме магнитного поля в течение одной сессии.

Параметры регистрации сигналов изотопов, процедура проведения анализа и расчета возраста. Подготовка зерен цирконов включала в себя их полоскание в 5%-м растворе азотной кислоты и промывание дистиллированной водой в ультразвуковой ванне. Затем кристаллы имплантировали в эпоксидную смолу, далее шлифовали примерно на 1/3 их толщины и полировали.

Анализ каждой пробы цирконов сопровождался измерением двух эталонных образцов циркона: один из них использовался в качестве внешнего стандарта, относительно которого нормировались изотопные отношения в исследуемых образцах; второй служил контрольным образцом для мониторинга правильности измерения. Выполнялась следующая последовательность анализа цирконовых эталонов и проб: в начале и в конце проводилось по 4 измерения внешнего стандарта, через каждые 5 измерений

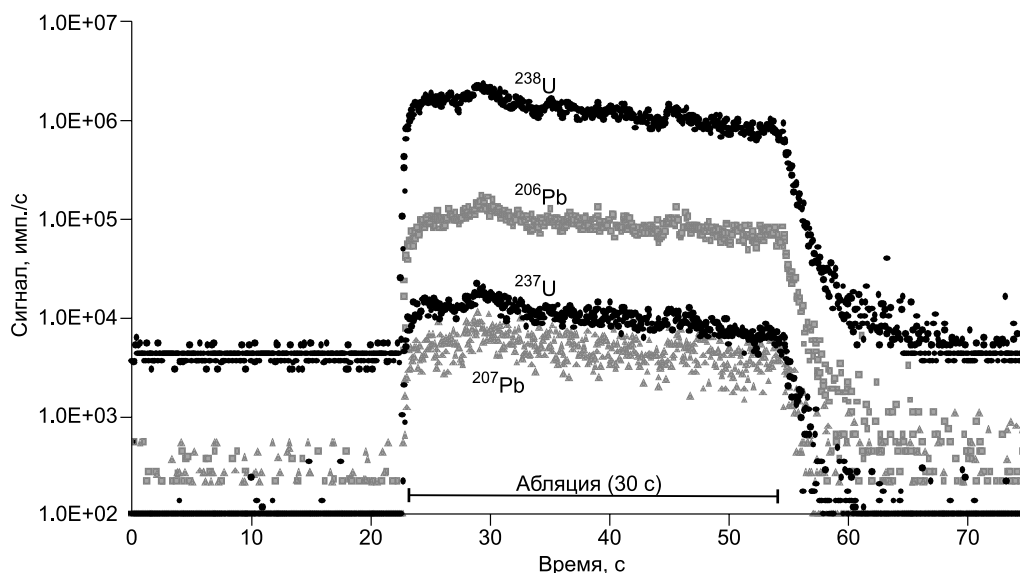


Рис. 2. Пример хроматограммы масс-спектрометрических ^{206}Pb -, ^{207}Pb -, ^{235}U - и ^{238}U -сигналов, полученных при лазерной абляции эталонного циркона Plešovice.

Первые 25 с — регистрация сигналов фона, затем 30 с — съемка испаренного вещества циркона, 15 с — продувка камеры абляции и трубок газовой системы от вещества пробы.

исследуемых образцов — 1—2 стандарта и через каждые 10 образцов проводились 2 измерения контрольного образца. Кроме того, в начале каждой сессии изотопного анализа выполнялась последовательность, состоящая из 8—10 измерений внешнего стандарта и 10—15 измерений контрольного образца, для оценки правильности настроек физических параметров LA-SF-ICP-MS системы.

Измерялись сигналы следующих изотопов: ^{202}Hg , $^{204}(\text{Hg} + \text{Pb})$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U (см. табл. 1). Детектирование сигналов проводилось в режиме счета (кроме изотопа ^{238}U), т.е. в режиме усиления сигнала за счет вторичного электронного умножителя с дискретными диодами.

На рис. 2 изображен пример хроматограммы одного измерения, представляющего собой 1000 сигналов, полученных в течение 75 с: из них первые 25 с измерялся фон (сигналы Ar-He газовой смеси и электронные шумы), следующие 30 с — аэрозоль пробы, испаренный лазером, оставшееся время отводилось на продувку лазерной камеры и мониторинг очистки газовой системы от вещества пробы. За сессию в 6 ч можно было провести измерение более 200 точек.

Обработка данных масс-спектрометрического анализа проводилась с помощью программы Glitter, разработанной Австралийским научным центром GEMOC при Университете Маккуори (г. Сидней) [Van Achterbergh et al., 2001; Griffin et al., 2008]. Программа производит фильтрацию и выделение оптимального сигнала, вычитание фона, коррекцию на инструментальный дрейф, дискриминацию и фракционирование изотопов, расчет изотопных отношений и возрастов ($^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$), а также их ошибок с использованием внешнего стандарта.

Для построения U-Pb диаграмм с конкордией использовался макрос Isoplot 3 [Ludwig, 2003], встроенный в среду Microsoft Excel 2003. Предполагалось, что в случае необходимости поправка на нерадиогенный свинец будет сделана относительно сигнала ^{204}Pb [Williams, 1998; Košler, Sylvester, 2003] по модели [Stacey, Kramers, 1975], избавленного от интерференции изотопа ^{204}Hg с учетом природного соотношения $^{202}\text{Hg}/^{204}\text{Hg} = 4.36$. Однако фоновый сигнал ртути оказался большим, интенсивность ^{202}Hg была на уровне 1000—2000 имп./с, что значительно выше нормального фона ($^{202}\text{Hg} \sim 200\text{—}400$ имп./с) [Frei, Gerdes, 2009], и, соответственно, не позволило корректно выявить и учесть содержание нерадиогенного ^{204}Pb . Оценка возможного присутствия обыкновенного примесного свинца в исследуемых цирконах проводилась с помощью диаграммы Терра-Вассербурга ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$), на которой наиболее наглядно проявляется наличие примесного свинца [Simonetti et al., 2006]. Данные изотопного состава исследуемых цирконов на диаграмме Терра-Вассербурга группировались на конкордии, близко друг к другу, что свидетельствует об отсутствии нерадиогенного свинца или его присутствии в малых количествах, не влияющих на оценку возраста.

Для определения возраста цирконов отношение $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ не учитывалось, поскольку в эталонных цирконах значение этого отношения не аттестовано. Кроме того, геохронологические данные по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ изотопному отношению, полученные методом LA-ICP-MS, значимо достоверны только при

возрасте цирконов более 1 млрд лет, для которых ошибка определения возраста (1σ) составляет менее 2 % [Gerdes, Zeh, 2006; Gehrels et al., 2008]. Поэтому для расчета средневзвешенного конкордантного возраста нами использовались только отношения $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДАТИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эталонные цирконы: прецизионность, повторяемость и правильность. В табл. 2 представлены средневзвешенные изотопные отношения и возрасты эталонных цирконов GJ-1 [Jackson et al., 2004], Plešovice [Sláma et al., 2008], Temora-2 и R-33 [Black et al., 2004], измеренных LA-SF-ICP-MS методом в качестве контрольных образцов в период с апреля 2013 г. по декабрь 2014 г. Значения погрешностей изотопных отношений, полученные в течение одной сессии (1–6 ч), характеризующие прецизионность, варьируют в следующих пределах (приведены на уровне 2σ): для $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — от 0.28 до 1.33 %, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — от 0.56 до 4.17 % (см. табл. 2). Следует отметить, что максимальные величины ошибок являются не только производной нестабильности процесса измерения, но также могут быть обусловлены некоторой неоднородностью изотопного состава цирконов [Frei, Gerdes, 2009]. Результаты датирования эталонных цирконов не обнаруживают их зависимости от используемого внешнего стандарта, поэтому

Таблица 2. Средневзвешенные значения U-Pb изотопных отношений и возрастов эталонных цирконов, измеренных как контрольные образцы LA-ICP-SF-MS методом

Дата проведения анализов	N	Изотопные отношения				Возраст, млн лет				Внешний станд.
		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$, %	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$, %	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	
Plešovice, аттестованный возраст 337.13 ± 0.37 (ID-TIMS) [Sláma et al., 2008]										
22.04.2013	26	0.05366	0.55	0.40140	1.80	337.00	1.80	343.00	5.40	GJ-1
06.05.2013	9	0.05339	0.70	0.39460	1.50	335.30	2.30	337.80	4.20	»
17.05.2013	7	0.05409	0.90	0.40000	2.0	340.00	3.00	341.60	5.90	»
14.05.2014	15	0.05326	0.63	0.39320	1.80	335.00	2.00	336.90	5.20	»
02.06.2014	26	0.05372	0.53	0.40850	1.90	337.40	1.7	348.00	5.50	»
03.06.2014	18	0.05371	0.61	0.40200	2.00	337.00	2.00	343.70	5.70	»
10.10.2014	26	0.05351	0.56	0.39180	1.60	336.10	1.80	335.80	4.40	R-33
18.11.2014	12	0.05386	0.93	0.40000	3.10	338.20	3.10	341.80	9.10	Temora-2
19.11.2014	71	0.05381	0.29	0.39410	0.83	337.87	0.94	337.40	2.40	»
21.11.2014	48	0.05372	0.31	0.39350	0.95	337.00	1.00	336.90	2.70	»
16.12.2014	44	0.05372	0.31	0.39700	0.59	337.00	1.00	339.50	1.70	»
17.12.2014	45	0.05397	0.32	0.39350	0.58	339.00	1.00	337.00	1.70	»
18.12.2014	22	0.05399	0.45	0.39370	0.81	338.90	1.50	337.10	2.30	»
Общее	372	0.053766	0.14	0.39530	0.28	337.61	0.40	338.30	0.82	
GJ-1, аттестованный возраст 608.5 ± 0.4 (ID-TIMS) [Jackson et al., 2004]										
06.05.2013	13	0.09900	0.57	0.81400	1.72	608.60	3.40	604.70	5.50	Plešovice
11.07.2014	4	0.09920	1.21	0.82700	3.02	609.90	7.30	612.00	14.00	»
14.07.2014	16	0.09880	0.59	0.82720	1.05	607.40	3.50	612.10	4.90	»
09.10.2014	6	0.09930	1.21	0.82700	3.75	610.10	7.40	612.00	18.00	»
Общее	39	0.09896	0.38	0.82160	0.76	608.30	2.20	609.00	3.50	
Temora-2, аттестованный возраст 416.78 ± 0.33 (ID-TIMS) [Black et al., 2004]										
17.05.2013	19	0.06664	0.62	0.50900	2.16	415.90	2.50	417.60	7.30	Plešovice
03.06.2014	20	0.06647	0.92	0.50300	4.17	414.90	3.80	414.00	15.00	»
17.11.2014	12	0.06763	1.33	0.52000	4.04	421.90	4.50	426.00	14.00	»
18.12.2014	20	0.06693	0.57	0.50300	2.19	417.60	2.40	414.00	5.00	»
Общее	71	0.06683	0.37	0.50600	1.10	417.10	1.50	416.00	3.80	—
R-33, аттестованный возраст 419.26 ± 0.39 (ID-TIMS) [Black et al., 2004]										
17.10.2014	26	0.06719	0.54	0.51350	0.90	419.20	2.20	420.80	3.10	Plešovice
23.10.2014	26	0.06693	0.52	0.51310	1.15	417.70	2.00	421.00	4.00	»
Общее	52	0.06706	0.38	0.51330	0.72	418.40	1.60	420.70	2.50	—

Примечание. N — количество анализов. Внешний станд. — эталонный циркон, используемый в качестве внешнего стандарта. Общее — средневзвешенные значения отношений, возрастов и ошибок, полученных для контрольного образца в течение всех сессий измерений.

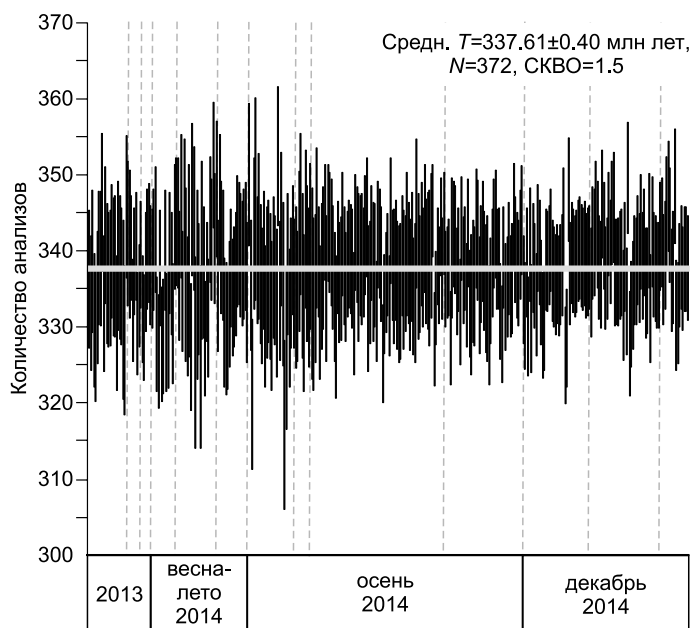


Рис. 3. Диаграмма средневзвешенного $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраста эталонного циркона Plešovice (LA-SF-ICP-MS метод).

Количество анализов — 372, полученных в течение 13 сессий (разделены пунктирными линиями) за более чем годовой промежуток времени (даты съёмки см. в табл. 2). Планки погрешностей на уровне 2σ .

измерение изотопного состава цирконов из магматических комплексов Забайкалья проводилось относительно цирконов Plešovice и Temoga-2, которые имелись в достаточном количестве.

Повторяемость (сходимость) анализа наилучшим образом отражается на данных, накопленных по контрольным измерениям циркона Plešovice. Погрешности средневзвешенных значений изотопных отношений для 372 точек, полученных более чем за годовой период, составляют для $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — 0.14 % и

$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — 0.28 % (см. табл. 2). На рис. 3 представлена диаграмма средневзвешенного возраста по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, из которой следует, что результаты достаточно хорошо воспроизводятся как в рамках одной сессии, так и в течение всех сессий измерений.

На рис. 4 продемонстрированы примеры построенных диаграмм с конкордией в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и расчета средневзвешенного возраста по данным LA-SF-ICP-MS анализа для эталонных цирконов. Сопоставление ID-TIMS и LA-SF-ICP-MS датировок показывает их хорошее совпадение. Наиболее наглядно точность и правильность LA-SF-ICP-MS методики определения U-Pb изотопных возрастов показана на рис. 5, на котором проиллюстрирована степень отклонения конкордантных датировок эталонных цирконов от их аттестованного возраста. Практически все данные укладываются в 1%-й диапазон ошибки, только в одном случае отклонение составляет 1.2 % от аттестованного возраста.

Приведенные данные о прецизионности, повторяемости и правильности полученных возрастов на примере измерения стандартных образцов цирконов, вполне соответствуют аналитическим показателям для U-Pb изотопного LA-SF-ICP-MS метода датирования цирконов, реализованного в других лабораториях [Tierpolo, 2003; Gerdes, Zeh, 2006; Frei, Gerdes, 2009].

Цирконы из магматических комплексов Западного Забайкалья: сравнение результатов LA-SF-ICP-MS и SHRIMP. Значительная часть территории Западного Забайкалья, более 200 тыс. км² (рис. 6), сложена разнотипными гранитоидами позднепалеозойского возраста, которые принадлежат к пяти интрузивным комплексам [Цыганков и др., 2010]. В порядке формирования это: 1) баргузинский комплекс (330—310 млн лет), включающий известково-щелочные авто- и аллохтонные биотитовые граниты, слагающие крупнейший в мире Ангаро-Витимский батолит [Литвиновский и др., 1993]; 2) чивыркуйский комплекс (305—285 млн лет) — высококалийевые кварцевые монцониты, кварцевые сиениты и габброиды; 3) зазинский комплекс (305—285 млн лет) — переходные от известково-щелочных к субщелочным граниты и кварцевые сиениты; 4) нижнеселенгинский комплекс (285—278 млн лет) — высококалийевые (шошонитовые) кварцевые сиениты, монцониты и габброиды; 5) раннекуналейский (281—278 млн лет) — щелочные и щелочно-полевошпатовые граниты и сиениты. Несмотря на значительное или даже полное перекрытие значений абсолютных возрастов комплексов, принятая последовательность их становления основана на геологических взаимоотношениях.

Ниже приведены результаты датирования LA-SF-ICP-MS методом цирконов из позднепалеозойских гранитоидов баргузинского, чивыркуйского, зазинского, нижнеселенгинского комплексов и мезозойского Халютинского месторождения барий-стронциевых карбонатитов. Значительная часть датировок получена для гранитоидов участка нижнего течения р. Курба (см. рис. 6), в пределах которого представлены практически все позднепалеозойские интрузивные комплексы и выявлены их геологические взаимоотношения [Рейф, 1976; Цыганков и др., 2007a; Litvinovsky et al., 2011]. Анализируемые кристаллы выбраны из тех же навесок, из которых ранее были отобраны зерна цирконов и получены U-Pb изотопные возрастные данные SIMS методом (прибор SHRIMP-II) [Цыганков и др., 2007b, 2010; Рипп и др., 2009]. Кроме того, дополнительно продатированы цирконы из пород баргузинского, чивыркуйского и нижнеселенгинского комплексов, по которым ранее не проводилось изотопно-геохронологических исследований, но имеются данные об их относительном возрасте.

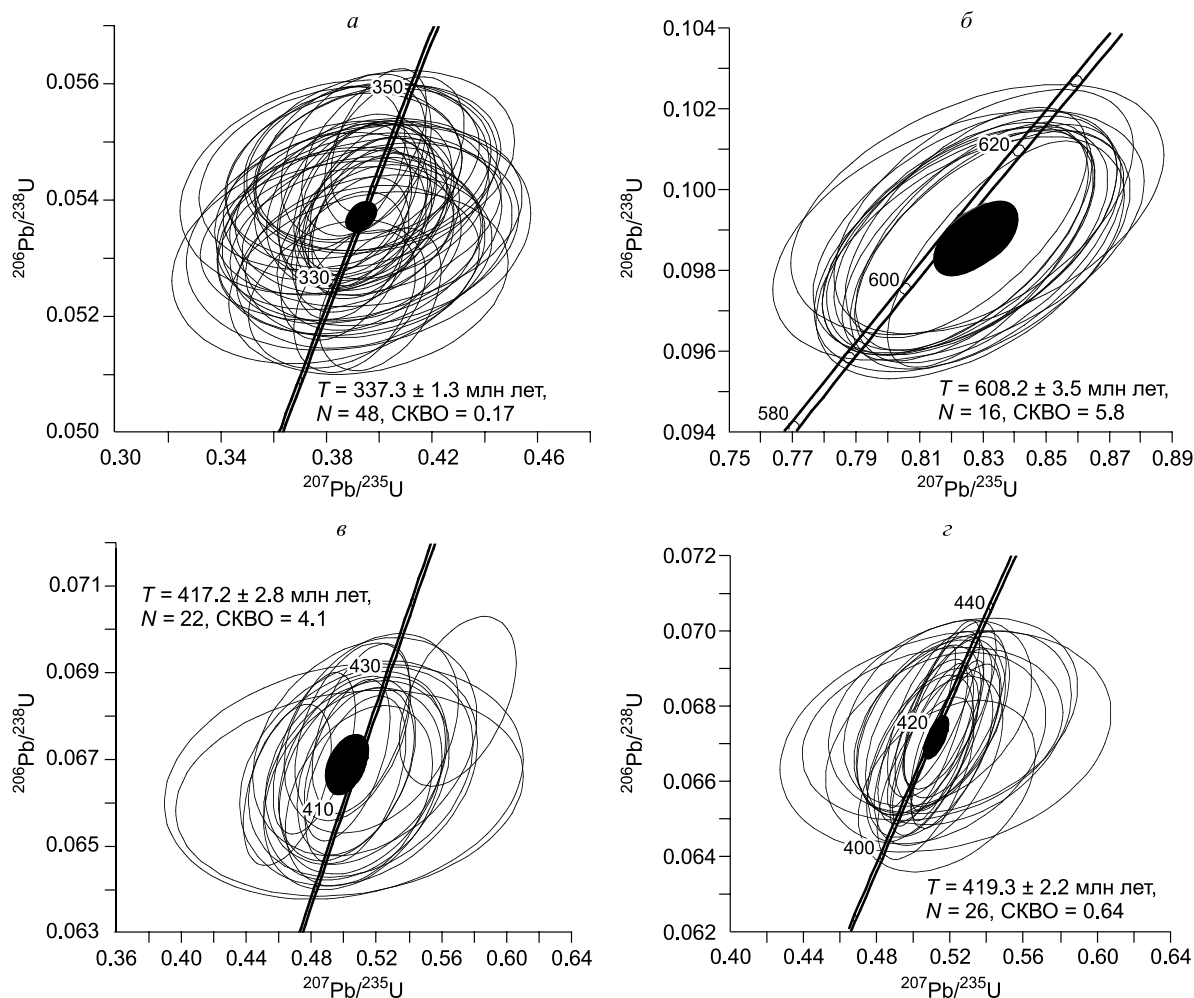


Рис. 4. Диаграммы с конкордией по данным LA-SF-ICP-MS U-Pb измерений эталонных цирконов.

a — Plešovice (аттестованный возраст 337 млн лет [Sláma et al., 2008]), съемка от 16.12.2014; *б* — GJ-1 (608 млн лет [Jackson et al., 2004]), съемка от 14.07.2014; *в* — Temoga-2 (417 млн лет [Black et al., 2004]), съемка от 18.12.2014; *г* — R-33 (419 млн лет [Black et al., 2004]), съемка от 17.10.2014. Значения ошибок приведены на уровне 2σ .

Исследовались цирконы из гранитов *баргузинского* комплекса: автохтонных — пр. Зг-65/1 (Зеленогневский массив), аллохтонных — Те-01-06 (Тэмэнский массив) и Г1-10-03 (Гольцовый массив). Цирконы пр. Зг-65/1 представлены призматическими идиоморфными кристаллами размером 80—400 мкм розовато-коричневой и коричневой окраски. Цирконы из гранитов Тэмэнского и Гольцового массивов — это идиоморфные прозрачные кристаллы (50—250 мкм) с красноватым оттенком. Следует отметить, что в цирконах Тэмэнского массива присутствуют в относительно большом количестве газожидкие и расплавные включения, мономинеральные включения апатита и полиминеральные агрегаты Kfs-Qtz-Pl состава, тогда как для цирконов из Гольцового массива включения нехарактерны. В катодоллюминесцентных лучах для всех цирконов трех проб отмечается тонкая магматическая зональность [Цыганков и др., 2007а, 2010]. Конкордантные возрасты, рассчитанные по данным SIMS, составляют для пр. Зг-65/1 — 325.3 ± 2.8 млн лет при СКВО = 2.5 [Цыганков и др., 2007а], для Те-01-06 — 318 ± 4 млн лет при СКВО = 3.2 и для Г1-10-03 — 313.3 ± 3 млн лет при СКВО = 0.069 [Цыганков и др., 2010].

Средневзвешенные конкордантные возрасты по данным LA-ICP-SF-MS метода (табл. 3, рис. 7, *a*, *б*, *в*): 323.7 ± 2.1 млн лет при СКВО = 6.3 для пр. Зг-65/1 по 19 точкам; 316.6 ± 2.3 млн лет при СКВО = 0.05 для пр. Те-01-06 по 12 точкам и 312.3 ± 2.2 млн лет при СКВО = 0.9 для гранита Г1-10-03 по 15 точкам.

Дополнительно с помощью метода LA-SF-ICP-MS были исследованы цирконы из гранитов баргузинского комплекса: пр. Вг-2-02, отобранной в верховьях р. Ангыр (правый приток р. Итанца), и пр. Вг-03-11, отобранной в бассейне р. Улюн (правый приток р. Баргузин). Цирконы из этих проб представляют собой прозрачные и полупрозрачные с желтоватым и коричневатым оттенком идиоморфные

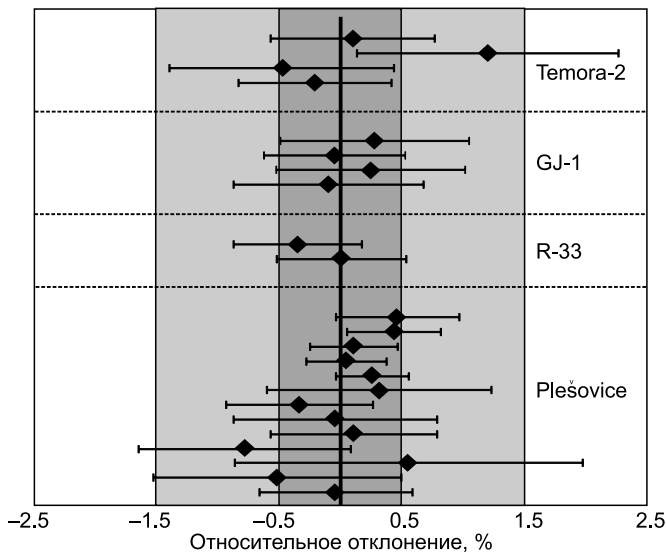


Рис. 5. Сравнение конкордантных LA-SF-ICP-MS датировок с аттестованными (ID-TIMS) значениями возраста эталонных цирконов.

Аттестованные значения возраста сведены в нулевую ось, по обе стороны от которой отложены поля относительных возрастных ошибок (в процентах). Каждая точка представляет собой $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ конкордантный возраст, полученный LA-SF-ICP-MS методом (даты съемок см. в табл. 2). Планки погрешностей на уровне 2 σ .

кристаллы размером 50—110 мкм. Средневзвешенный конкордантный возраст цирконов пр. Вг-2-02, полученный по 16 точкам, составляет 301.6 ± 2.2 млн лет при СКВО = 2.5 (см. табл. 3, рис. 7, з); для цирконов пр. Вг-03-11 по 20 точкам — 293.2 ± 1.3 млн лет при СКВО = 0.36 (см. табл. 3, рис. 7, д).

Из пород чивыркуйского комплекса были выделены цирконы из монцонитов Хангинтуйского массива (пр. Хн-62а) и кварцевых сиенитов второй фазы Бургасской интрузии (Вг-113-04). Для цирконов пр. Хн-62а характерны вариация окраски от светло-розового оттенка в прозрачных кристаллах до коричневого цвета в мутных зернах. Внутреннее строение характеризуется большим разнообразием газо-

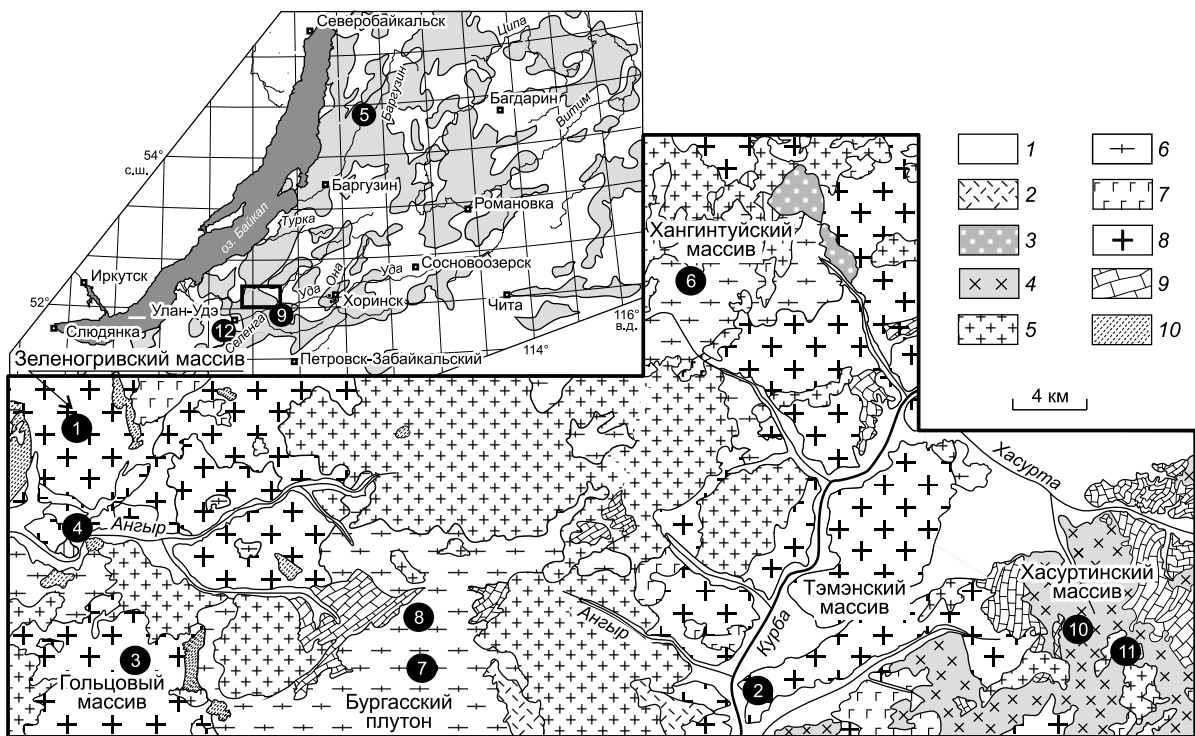


Рис. 6. Схема геологического строения нижнего течения р. Курба, составлена по данным [Рейф, 1976] с добавлениями авторов.

1 — четвертичные отложения; 2 — бимодальная трахибазальт-комендитовая вулканическая серия (Г[?]); 3 — щелочно-полевошпатовые и щелочные граниты и сиениты раннекуналейского комплекса (P₁); 4 — шошонитовые монцониты и сиениты нижнеселенгинского комплекса (С-Р); 5 — переходные от известково-щелочных к субщелочным граниты и кварцевые сиениты зазинского комплекса (С-Р); 6, 7 — высококальциевые известково-щелочные гранитоиды с пониженной кремнекислотностью чивыркуйского комплекса (С-Р); кварцевые монцониты и кварцевые сиениты (6), габброиды (7); 8 — высококальциевые известково-щелочные граниты баргузинского комплекса; 9 — известняки (PZ₁?); 10 — метаморфические породы (PR₃?). На врезке серым полем показана площадь распространения позднепалеозойских гранитоидов в Забайкалье, прямоугольником выделен контур участка в нижнем течении р. Курба. Кружками на схеме и врезке показаны места отбора проб, в которых проводилось U-Pb изотопное датирование цирконов (цифры соответствуют порядковым номерам в табл. 4).

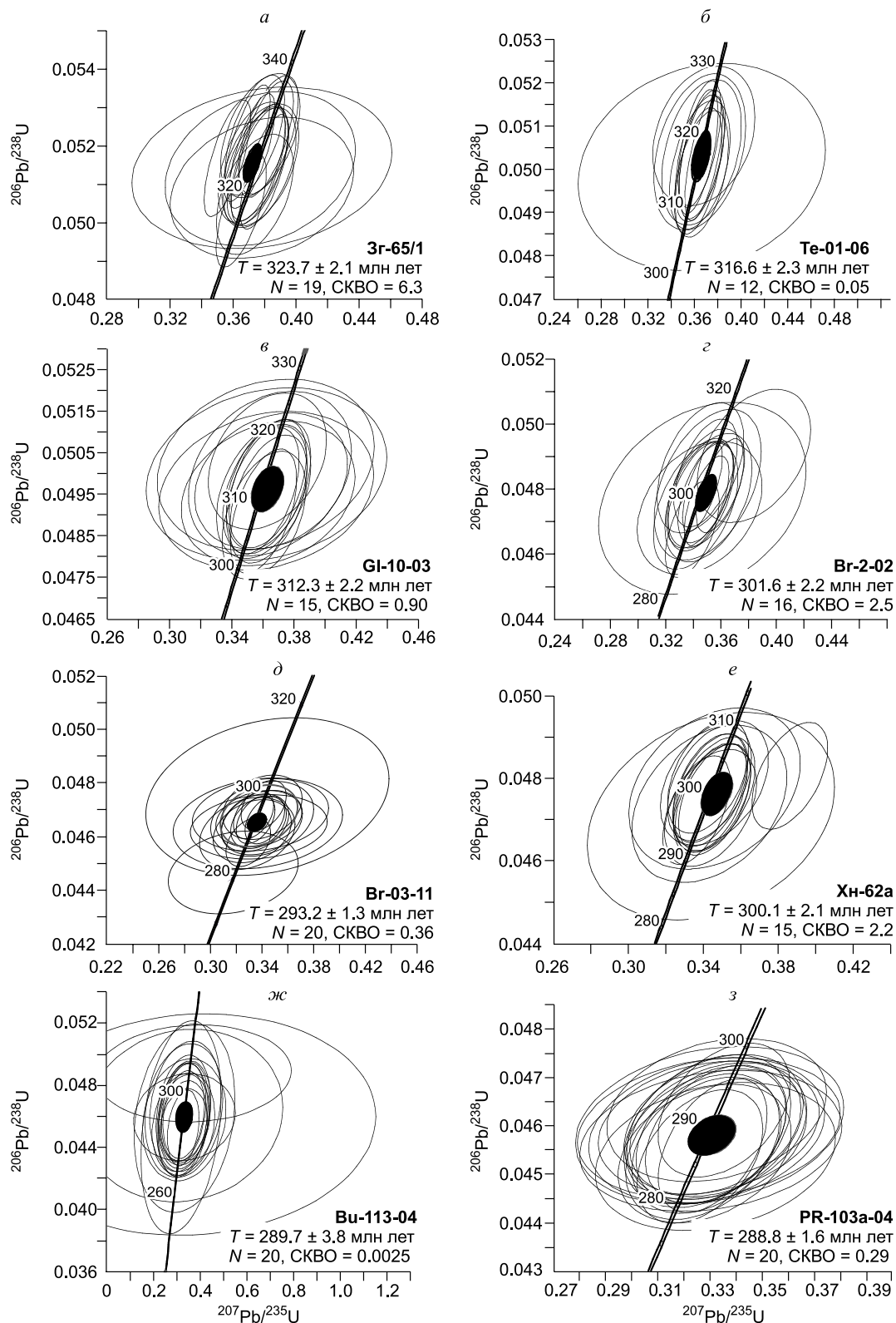


Рис. 7. Диаграммы с конкордией для цирконов из позднепалеозойских баргузинского и чивыркуйского интрузивных комплексов Забайкалья (U-Pb LA-SF-ICP-MS метод).

a—d — баргузинский комплекс: гранит Зеленогровского массива (*a*), гранит Тэмэнского массива (*б*), гранит Гольцового массива (*в*), гранит из верховьев р. Ангыр (*г*), гранит из бассейна р. Улюн (*д*); *e—з* — чивыркуйский комплекс: монзонит Хангинтуйского массива (*e*), монзонит (*ж*) и кварцевый сиенит (*з*) Бургасской интрузии. Значения ошибок приведены на уровне 2σ .

Таблица 3. Результаты датирования цирконов из позднепалеозойских гранитоидных комплексов Западного Забайкалья и мезозойского карбонатитового месторождения LA-SF-ICP-MS U-Pb методом

Номер точки	Изотопные отношения				Rho	Возраст, млн лет				D, %
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$, %	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$, %		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Баргузинский комплекс</i>										
Пр. Зг-65/1, Зеленогравский массив										
1	0.36534	1.78	0.0503	1.19	0.67	325.1	7.58	328.3	4.07	-0.97
2	0.37397	2.67	0.05072	1.26	0.47	326	17.54	320	4.63	1.88
3	0.37853	6.29	0.05089	1.47	0.23	322.6	5.71	328.4	3.89	-1.77
4	0.38011	1.67	0.05131	1.19	0.71	316.2	4.85	316.4	3.69	-0.06
5	0.37745	6.55	0.05139	1.60	0.24	327.9	5.17	327.7	3.81	0.06
6	0.37833	8.93	0.05141	1.67	0.19	324.1	5.21	324.1	3.8	0
7	0.37709	2.5	0.05142	1.24	0.50	321.8	6.74	324.1	3.95	-0.71
8	0.37632	1.87	0.05146	1.2	0.64	329	5.71	328.5	3.89	0.15
9	0.37568	2.11	0.05147	1.22	0.58	325.8	24.89	323.2	5.26	0.8
10	0.37746	2.65	0.05149	1.26	0.48	325.2	18.24	323.1	5.03	0.65
11	0.37597	1.88	0.05155	1.20	0.64	309.6	4.51	324.7	3.77	-4.65
12	0.37286	2.44	0.05156	1.24	0.51	325.2	7.38	323.6	4	0.49
13	0.35654	1.69	0.05166	1.2	0.71	324.3	5.20	323.5	3.8	0.25
14	0.37204	1.62	0.05185	1.18	0.73	323.9	5.84	323.5	3.84	0.12
15	0.36909	1.62	0.05205	1.19	0.74	321.2	4.46	325.9	3.77	-1.44
16	0.3812	1.84	0.05216	1.19	0.64	327.1	4.67	322.5	3.71	1.43
17	0.37743	2.72	0.05225	1.26	0.46	324.9	6.96	323.3	3.94	0.49
18	0.37396	2.07	0.05226	1.22	0.59	322.6	7.39	318.9	3.93	1.16
19	0.38260	2.03	0.05227	1.21	0.59	319	4.43	327.1	3.78	-2.48
Пр. Те-01-06, Тэмэнский массив										
1	0.36731	11.82	0.0501	1.96	0.17	317.7	32.25	315.2	6.04	0.79
2	0.36704	3.8	0.05044	1.37	0.36	317.5	10.37	317.2	4.23	0.09
3	0.36553	4.41	0.05045	1.47	0.33	316.3	11.99	317.3	4.53	-0.32
4	0.36561	2.36	0.0503	1.19	0.5	316.4	6.42	316.4	3.7	0.01
5	0.36747	2.21	0.05039	1.21	0.55	317.8	6.02	316.9	3.74	0.28
6	0.36534	2.06	0.05063	1.19	0.58	316.2	5.6	318.4	3.7	-0.69
7	0.3645	2.26	0.05001	1.2	0.53	315.6	6.13	314.6	3.7	0.32
8	0.36447	1.89	0.05045	1.17	0.62	315.5	5.12	317.3	3.65	-0.57
9	0.36891	1.79	0.0503	1.17	0.66	318.8	4.9	316.4	3.61	0.76
10	0.36694	2.59	0.04994	1.2	0.46	317.4	7.07	314.2	3.66	1.02
11	0.36913	4.86	0.05082	1.3	0.27	319	13.3	319.6	4.06	-0.19
12	0.36559	2.9	0.05015	1.22	0.42	316.4	7.88	315.4	3.73	0.32
Пр. Г1-10-03, Гольцовый массив										
1	0.3632	4.28	0.05029	1.33	0.31	314.6	11.58	316.3	4.14	-0.54
2	0.36549	5.5	0.04981	1.35	0.24	316.3	14.95	313.3	4.10	0.96
3	0.36377	2.8	0.04938	1.28	0.46	315	7.59	310.7	3.85	1.38
4	0.36337	2.81	0.04975	1.27	0.45	314.7	7.60	313	3.85	0.54
5	0.36159	3.07	0.0496	1.27	0.41	313.4	8.27	312.1	3.90	0.42
6	0.36221	7.81	0.04958	1.57	0.20	313.9	21.08	311.9	4.80	0.64
7	0.36385	3.04	0.04973	1.29	0.42	315.1	8.24	312.9	3.95	0.7
8	0.36012	2.65	0.04958	1.25	0.47	312.3	7.12	312	3.83	0.1
9	0.36472	5.88	0.04999	1.62	0.28	315.7	15.96	314.5	5.00	0.38
10	0.36064	2.42	0.04909	1.24	0.51	312.7	6.51	308.9	3.74	1.23
11	0.36248	8.74	0.04998	1.7	0.19	314.1	23.61	314.4	5.22	-0.1
12	0.36065	3.44	0.04956	1.33	0.39	312.7	9.25	311.8	4.06	0.29
13	0.36201	7.89	0.05021	1.67	0.21	313.7	21.29	315.8	5.17	-0.66
14	0.36356	6.29	0.04951	1.43	0.23	314.9	17.02	311.5	4.38	1.09
15	0.36096	3.06	0.04899	1.29	0.42	312.9	8.23	308.3	3.85	1.49

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пр. Вг-2-02, р. Ангыр (Итандинский)										
1	0.34659	1.71	0.04805	1.17	0.68	302.2	4.46	302.5	3.42	-0.1
2	0.34453	5.37	0.04742	1.77	0.33	300.6	13.97	298.7	5.17	0.64
3	0.34507	3.72	0.04865	1.69	0.45	301	9.69	306.2	5.02	-1.7
4	0.3839	4.37	0.04902	1.71	0.39	329.9	12.31	308.5	5.15	6.94
5	0.34558	2.84	0.04778	1.44	0.51	301.4	7.4	300.9	4.23	0.17
6	0.3465	8.88	0.04771	2.54	0.29	302.1	23.21	300.4	7.43	0.57
7	0.34887	2.69	0.04849	1.4	0.52	303.9	7.05	305.2	4.16	-0.43
8	0.35034	4.52	0.04813	1.97	0.44	305	11.9	303	5.85	0.66
9	0.34167	3.66	0.04748	1.68	0.46	298.4	9.48	299.1	4.93	-0.23
10	0.3489	2.36	0.04788	1.32	0.56	303.9	6.19	301.5	3.85	0.8
11	0.33912	2.34	0.04677	1.3	0.56	296.5	6.02	294.6	3.76	0.64
12	0.34456	2.89	0.04787	1.44	0.5	300.6	7.52	301.5	4.24	-0.3
13	0.35092	3.68	0.04773	1.7	0.46	305.4	9.72	300.6	5	1.6
14	0.34961	1.89	0.04762	1.2	0.63	304.4	4.96	299.9	3.5	1.5
15	0.34901	3.24	0.04802	1.56	0.48	304	8.51	302.3	4.6	0.56
16	0.3597	2	0.0481	1.23	0.61	312	5.37	302.8	3.63	3.04
Пр. Вг-03-11, р. Улюн										
1	0.33353	1.90	0.0468	0.77	0.40	292.3	4.82	294.8	2.24	-0.85
2	0.33686	7.94	0.04649	1.48	0.19	294.8	20.32	292.9	4.23	0.65
3	0.33477	3.17	0.04651	0.95	0.30	293.2	8.07	293.1	2.7	0.03
4	0.33758	6.40	0.04636	1.06	0.17	295.3	16.41	292.1	3.04	1.10
5	0.33509	1.82	0.04662	0.77	0.42	293.4	4.65	293.7	2.22	-0.10
6	0.34227	1.82	0.04661	0.77	0.42	298.9	4.72	293.7	2.22	1.77
7	0.31783	6.46	0.04466	1.41	0.22	280.2	15.81	281.7	3.86	-0.53
8	0.3389	6.34	0.04681	1.17	0.19	296.3	16.3	294.9	3.42	0.47
9	0.32946	2.14	0.04579	0.81	0.38	289.2	5.38	288.6	2.28	0.21
10	0.34423	11.16	0.04749	2.53	0.23	300.4	29.01	299.1	7.37	0.43
11	0.34134	2.09	0.04716	0.81	0.39	298.2	5.39	297.1	2.33	0.37
12	0.32866	4.59	0.04611	1.19	0.26	288.5	11.53	290.6	3.36	-0.72
13	0.3402	4.78	0.04666	1.22	0.26	297.3	12.32	294	3.49	1.12
14	0.34034	3.68	0.04709	1.04	0.28	297.4	9.5	296.6	3	0.27
15	0.33761	4.02	0.04666	0.92	0.23	295.4	10.3	294	2.63	0.48
16	0.33739	2.60	0.04653	0.86	0.33	295.2	6.67	293.2	2.49	0.68
17	0.33989	3.78	0.04652	1.05	0.28	297.1	9.74	293.1	3.01	1.36
18	0.33772	3.61	0.04677	1.00	0.28	295.4	9.25	294.6	2.91	0.27
20	0.33251	3.71	0.0462	1.04	0.28	489.9	27.25	501.8	7.69	-2.37
<i>Чивыркуйский комплекс</i>										
Пр. Хн-62а, Хангинтуйский массив										
1	0.34372	2.38	0.04772	1.17	0.49	300	6.18	300.5	3.42	-0.17
2	0.33623	2.18	0.04724	1.14	0.52	294.3	5.58	297.6	3.31	-1.11
3	0.34599	5.41	0.04776	1.68	0.31	301.7	14.12	300.7	4.92	0.33
4	0.34424	2.27	0.04754	1.14	0.5	300.4	5.91	299.4	3.34	0.33
5	0.34571	2.57	0.04762	1.2	0.47	301.5	6.71	299.9	3.51	0.53
6	0.34462	2.44	0.04749	1.16	0.47	300.7	6.35	299.1	3.4	0.53
7	0.34401	7.85	0.04709	2.19	0.28	300.2	20.4	296.7	6.31	1.18
8	0.38622	2.14	0.04807	1.1	0.51	331.6	6.07	302.7	3.27	9.55
9	0.34316	2.67	0.04789	1.19	0.45	299.6	6.92	301.5	3.52	-0.63
10	0.34595	2.27	0.04755	1.11	0.49	301.7	5.94	299.5	3.27	0.73
11	0.34589	3.41	0.0479	1.29	0.38	301.6	8.89	301.6	3.78	0
12	0.34327	2.34	0.04777	1.13	0.48	299.6	6.07	300.8	3.33	-0.4
13	0.34252	2.58	0.04805	1.17	0.45	299.1	6.69	302.5	3.45	-1.12
14	0.3438	2.91	0.04729	1.23	0.42	300	7.56	297.9	3.55	0.7
15	0.34318	4.93	0.04739	1.65	0.33	299.6	12.8	298.5	4.78	0.37

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пр. Ву-113-04, Бургасская интрузия										
1	0.32743	8.42	0.04524	2.19	0.26	287.6	21.09	285.3	6.08	0.81
2	0.31794	21.96	0.04529	6.16	0.28	280.3	53.79	285.6	17.19	-1.86
3	0.32917	11.77	0.04623	2.77	0.24	288.9	29.59	291.3	7.91	-0.82
4	0.32873	16.66	0.04549	2.95	0.18	288.6	41.84	286.8	8.26	0.63
5	0.32927	11.02	0.04609	2.5	0.23	289	27.72	290.5	7.07	-0.52
6	0.32379	13.72	0.04578	3.23	0.24	284.8	34.08	288.6	9.15	-1.32
7	0.33082	12.22	0.04563	2.37	0.19	290.2	30.86	287.6	6.66	0.9
8	0.33305	26.45	0.04588	5.38	0.2	291.9	67.1	289.2	15.23	0.93
9	0.36772	87.13	0.04546	6.38	0.07	318	237.86	286.6	17.9	10.96
10	0.33329	26.63	0.04593	2.48	0.09	292.1	67.59	289.5	7.01	0.9
11	0.33186	21.99	0.04577	3.5	0.16	291	55.65	288.5	9.85	0.87
12	0.33332	13.81	0.04608	3.06	0.22	292.1	35.05	290.4	8.69	0.59
13	0.32979	12.69	0.04531	2.21	0.17	289.4	31.96	285.7	6.15	1.3
14	0.33698	18.45	0.04662	3.67	0.2	294.9	47.22	293.7	10.52	0.41
15	0.33053	13.61	0.04578	3.28	0.24	290	34.33	288.6	9.27	0.49
16	0.3294	52.69	0.04604	4.91	0.09	289.1	132.56	290.2	13.91	-0.38
17	0.33111	13.21	0.0459	2.46	0.19	290.4	33.36	289.3	6.98	0.38
18	0.33071	20.59	0.04635	3.78	0.18	290.1	51.97	292.1	10.8	-0.68
19	0.32803	14.48	0.04618	3.29	0.23	288.1	36.32	291.1	9.37	-1.03
20	0.37195	45.85	0.04873	2.61	0.06	321.1	126.22	306.7	7.83	4.7
Пр. PR-103a-04, Бургасская интрузия										
1	0.33203	4.26	0.04579	1.22	0.29	291.1	10.79	288.6	3.47	0.87
2	0.3276	4.13	0.04543	1.28	0.31	287.7	10.36	286.4	3.58	0.45
3	0.33507	3.08	0.04632	1.21	0.39	293.4	7.85	291.9	3.45	0.51
4	0.32847	5.62	0.0459	1.33	0.24	288.4	14.11	289.3	3.75	-0.31
5	0.33285	4.16	0.04592	1.22	0.29	291.7	10.55	289.4	3.43	0.79
6	0.32933	6.24	0.04595	1.28	0.21	289.1	15.69	289.6	3.63	-0.17
7	0.33197	3.33	0.04582	1.27	0.38	291.1	8.43	288.8	3.58	0.8
8	0.33229	5.17	0.04632	1.3	0.25	291.3	13.1	291.9	3.71	-0.21
9	0.32958	6.37	0.04601	1.43	0.23	289.2	16.03	290	4.07	-0.28
10	0.32683	3.68	0.04557	1.34	0.36	287.1	9.21	287.2	3.74	-0.03
11	0.33163	4.16	0.04597	1.33	0.32	290.8	10.53	289.7	3.75	0.38
12	0.33176	5.66	0.04537	1.37	0.24	290.9	14.33	286.1	3.82	1.68
13	0.3301	3.55	0.04581	1.27	0.36	289.6	8.95	288.8	3.56	0.28
14	0.32868	3.97	0.04589	1.39	0.35	288.6	9.98	289.3	3.92	-0.24
15	0.32585	3.02	0.04537	1.23	0.41	286.4	7.53	286.1	3.44	0.1
16	0.32835	3.55	0.0456	1.25	0.35	288.3	8.92	287.5	3.52	0.28
17	0.33076	2.57	0.04559	1.23	0.48	290.1	6.48	287.4	3.43	0.94
18	0.33062	4.19	0.04596	1.22	0.29	290	10.57	289.7	3.45	0.1
19	0.32921	5.25	0.04596	1.22	0.23	289	13.19	289.7	3.47	-0.24
20	0.32996	6.22	0.04569	1.29	0.21	289.5	15.66	288	3.65	0.52
<i>Зазинский комплекс</i>										
Пр. 023a-04, Унэгтэйский массив										
1	0.33501	7.56	0.04616	1.97	0.26	293.4	19.25	290.9	5.58	0.86
2	0.32763	8.64	0.04564	2.17	0.25	287.8	21.65	287.7	6.09	0.03
3	0.33754	13.1	0.04673	2.18	0.17	295.3	33.57	294.4	6.27	0.31
4	0.33166	8.26	0.04596	2.05	0.25	290.8	20.88	289.7	5.82	0.38
5	0.32974	13.28	0.0464	1.81	0.14	289.4	33.43	292.4	5.2	-1.03
6	0.32981	13.24	0.04645	2.33	0.18	289.4	33.36	292.7	6.63	-1.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	0.33128	9.91	0.04594	2.33	0.23	290.5	25.05	289.6	6.57	0.31
8	0.32781	7.68	0.04546	1.85	0.24	287.9	19.26	286.6	5.18	0.45
9	0.33906	17.08	0.04632	2.72	0.16	296.5	43.9	291.9	7.79	1.58
10	0.3295	12.2	0.0458	2.25	0.18	289.2	30.71	288.7	6.36	0.17
11	0.39372	8.73	0.04607	2	0.23	337.1	25.05	290.4	5.7	16.08
12	0.33337	9.46	0.04601	2.11	0.22	292.1	24.02	289.9	6	0.76
13	0.31743	15.76	0.04428	3.61	0.23	279.9	38.55	279.3	9.85	0.21
14	0.33859	7.94	0.04666	1.99	0.25	296.1	20.4	294	5.72	0.71
15	0.335	20.07	0.04656	2.66	0.13	293.4	51.13	293.4	7.63	0
16	0.33014	9.41	0.04586	2.07	0.22	289.7	23.71	289.1	5.88	0.21
17	0.33279	4.94	0.04598	1.48	0.3	291.7	12.54	289.8	4.2	0.66
18	0.32773	21.87	0.04563	4.8	0.22	287.8	54.81	287.7	13.47	0.03
19	0.32688	11.8	0.0455	2.97	0.25	287.2	29.51	286.8	8.35	0.14
20	0.33461	26.79	0.04575	2.45	0.09	293.1	68.2	288.4	6.91	1.63

*Нижнеселенгинский комплекс***Пр. Хс-59а, Хасуртинский массив**

1	0.32540	2.7	0.04517	1.46	0.54	286	6.73	284.8	4.08	0.42
2	0.32084	3.25	0.04473	1.48	0.45	282.5	8.01	282.1	4.04	0.14
3	0.32566	3	0.04489	1.58	0.53	286.3	7.48	283.1	4.35	1.13
4	0.32357	2.35	0.04489	1.36	0.58	284.6	5.84	283	3.74	0.57
5	0.32414	8.48	0.04546	3.23	0.38	285.1	21.08	286.6	9.05	-0.52
6	0.32313	1.72	0.04481	1.18	0.69	284.3	4.27	282.6	3.24	0.6
7	0.32268	2.03	0.04484	1.25	0.62	284	5.03	282.8	3.48	0.42
8	0.32198	3.51	0.04509	1.73	0.49	283.4	8.69	284.3	4.81	-0.32
9	0.32184	2.72	0.04491	1.31	0.48	283.3	6.72	283.2	3.63	0.04
10	0.32626	1.83	0.04490	1.18	0.64	286.7	4.58	283.1	3.28	1.27

Пр. Хс-55а, Хасуртинский массив

1	0.31912	7.45	0.04475	1.72	0.23	281.2	18.3	282.2	4.77	-0.35
2	0.32406	3.84	0.04464	1.28	0.33	285	9.54	281.5	3.5	1.24
3	0.31960	3.18	0.04439	1.28	0.4	281.6	7.81	280	3.51	0.57
4	0.32051	3.26	0.04443	1.31	0.4	282.3	8.03	280.2	3.55	0.75
5	0.31969	4.3	0.04394	1.3	0.3	281.7	10.59	277.2	3.52	1.62
6	0.32029	6.22	0.04447	1.33	0.21	282.1	15.33	280.5	3.64	0.57
7	0.31477	9.85	0.04409	1.41	0.14	277.9	23.93	278.1	3.8	-0.07
8	0.31875	4.71	0.04388	1.25	0.27	280.9	11.56	276.8	3.42	1.48
9	0.31678	5.83	0.04388	1.34	0.23	279.4	14.24	276.9	3.66	0.9
10	0.32125	7.5	0.04359	1.51	0.2	282.9	18.5	275	4.07	2.87
11	0.31854	5.73	0.04416	1.36	0.24	280.8	14.06	278.6	3.68	0.79
12	0.31893	3.32	0.04422	1.29	0.39	281.1	8.15	278.9	3.54	0.79
13	0.32445	7.53	0.04472	1.5	0.2	285.3	18.73	282	4.15	1.17
14	0.32156	6.67	0.04491	1.47	0.22	283.1	16.48	283.2	4.06	-0.04
15	0.32156	3.34	0.04461	1.3	0.39	283.1	8.25	281.3	3.58	0.64
16	0.32296	10.23	0.04491	1.47	0.14	284.2	25.37	283.2	4.06	0.35
17	0.32041	11.05	0.04451	1.64	0.15	282.2	27.23	280.7	4.49	0.53

Халютинское карбонатитовое месторождение

1	0.14308	3.67	0.02074	1.3	0.35	135.8	4.66	132.3	1.73	2.65
2	0.14236	5.67	0.02062	1.55	0.27	135.1	7.17	131.6	2.02	2.66
3	0.13677	10.67	0.02048	1.86	0.17	130.2	13.04	130.7	2.4	-0.38
4	0.1477	8.77	0.02181	2.52	0.29	139.9	11.47	139.1	3.46	0.58
5	0.1542	6.17	0.02061	1.75	0.28	145.6	8.37	131.5	2.27	10.72
6	0.13856	7.22	0.02067	1.64	0.23	131.8	8.93	131.9	2.16	-0.08

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	0.14038	5.29	0.02061	1.65	0.31	133.4	6.61	131.5	2.16	1.44
8	0.13706	6.57	0.02051	1.41	0.22	130.4	8.05	130.9	1.86	-0.38
9	0.13876	4.30	0.02025	1.43	0.33	131.9	5.31	129.2	1.85	2.09
10	0.14088	5.37	0.0208	1.63	0.3	133.8	6.73	132.7	2.12	0.83
11	0.13902	4.81	0.02054	1.56	0.32	132.2	5.95	131	2.01	0.92
12	0.13819	4.25	0.02053	1.41	0.33	131.4	5.23	131	1.86	0.31
13	0.14012	6.02	0.02038	1.52	0.25	133.1	7.52	130.1	1.94	2.31
14	0.13916	4.31	0.02037	1.47	0.34	132.3	5.35	130	1.9	1.77
15	0.14207	4.63	0.02051	1.51	0.33	134.9	5.85	130.9	1.94	3.06

Примечание. Rho — коэффициент корреляции между ошибками определения отношений $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. D — дискордантность: $D = (\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1) \cdot 100$.

во-жидких и расплавных включений, высоким двупреломлением, слабой зональностью [Цыганков и др., 2007а,б]. Возраст, определенный по 9 точкам SIMS методом, составляет 302.3 ± 3.7 млн лет, СКВО = 0.26. Конкордантный возраст по 15 точкам, измеренным LA-SF-ICP-MS методом, — 300.1 ± 2.1 млн лет, СКВО = 2.2 (см. табл. 3, рис. 7, e).

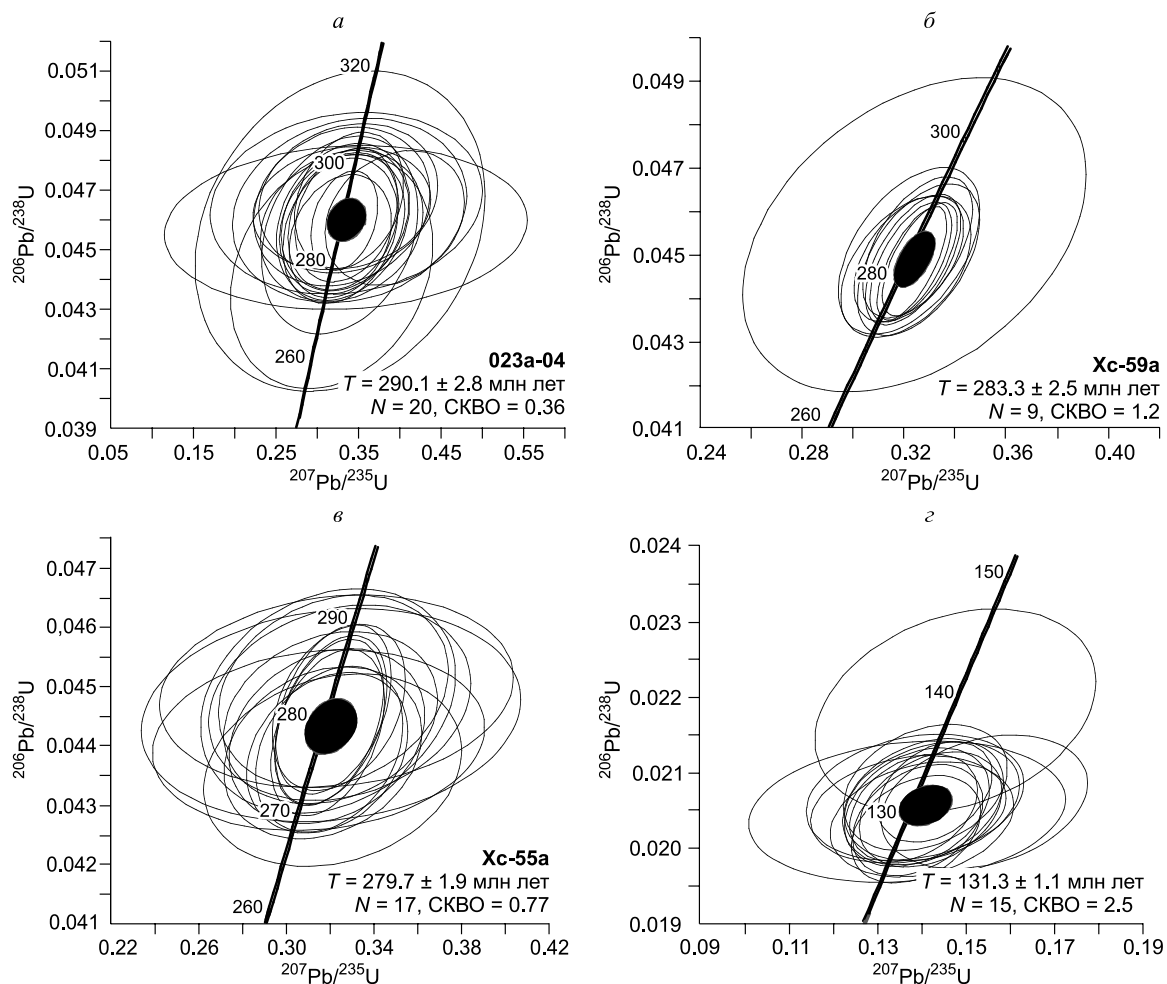


Рис. 8. Диаграммы с конкордией для цирконов из позднепалеозойских зазинского, нижнеселенгинского интрузивных комплексов и мезозойского Халютинского карбонатитового месторождения Забайкалья (U-Pb LA-SF-ICP-MS метод).

a — зазинский комплекс, лейкогранит Унэгтэйского массива; б, в — нижнеселенгинский комплекс: монцитит (б) и сиенит (в) Хасуртинского массива; г — Халютинское месторождение барий-стронциевых карбонатитов. Значения ошибок приведены на уровне 2σ .

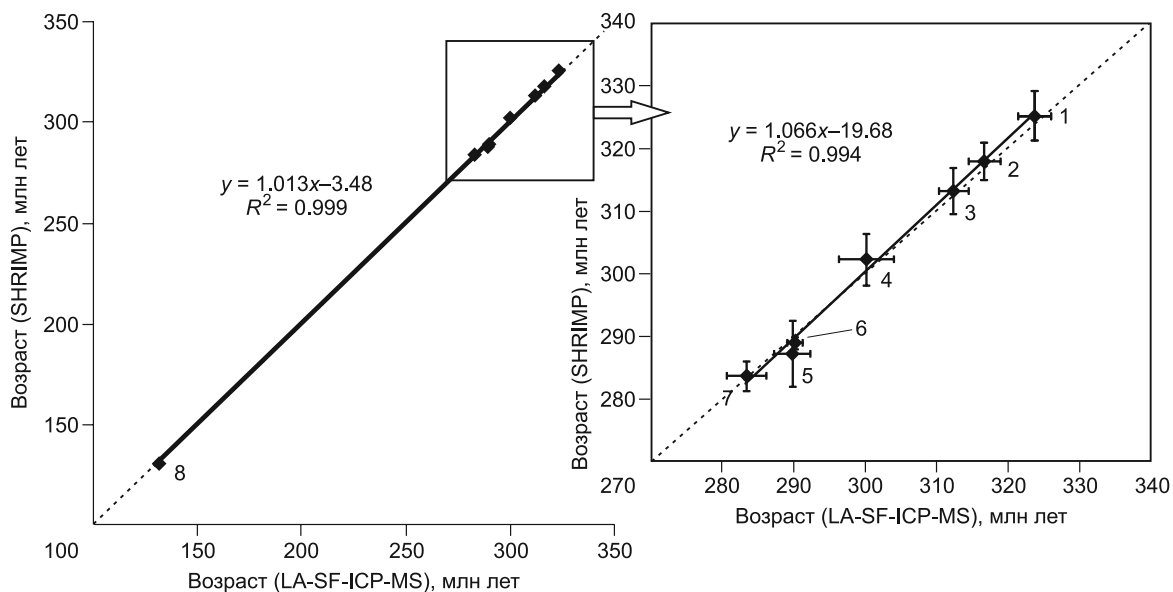


Рис. 9. Сопоставление результатов U-Pb изотопного датирования цирконов из позднепалеозойских гранитоидных массивов и мезозойского Халютинского месторождения Западного Забайкалья, полученных LA-SF-ICP-MS и SIMS [Цыганков и др., 2007а, 2010; Рипп и др., 2009] методами.

Цифрами обозначены: 1—3 — баргузинский комплекс: гранит Зеленогровского массива (1), гранит Тэмэнского массива (2), гранит Гольцового массива (3); 4, 5 — чивыркуйский комплекс: монцитит Хангинтуйского массива (4) и монцитит Бургасской интрузии (5); 6 — зазинский комплекс, лейкогранит Унэгэтэйского массива; 7 — нижнеселенгинский комплекс, монцитит Хасуртинского массива; 8 — Халютинское месторождение барий-стронциевых карбонатов. Сплошная линия — это линейный тренд, образованный LA-ICP-MS и SIMS возрастными данными. Пунктирная линия соответствует идеальной сходимости данных. Планки погрешностей на уровне 2σ .

Цирконы в пр. Ву-113-04 (кварцевый сиенит Бургасской интрузии) представлены идиоморфными однородными кристаллами желтого цвета [Цыганков и др., 2010]. Конкордантное значение возраста, полученное по 12 точкам SIMS методом, составляет 287.3 ± 4.1 млн лет при СКВО = 0.45. По данным LA-ICP-SF-MS получена дата — 289.7 ± 3.8 млн лет при СКВО = 0.0025 (20 точек) (см. табл. 3, рис. 6, ж).

С помощью LA-SF-ICP-MS также были проанализированы цирконы, выделенные из монцититов первой фазы Бургасской интрузии, пр. PR-103а-04. Средневзвешенный $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст по 20 точкам составил 288.8 ± 1.6 млн лет, СКВО = 0.29 (см. табл. 3, рис. 7, з), что практически полностью совпадает с возрастом прорывающих их сиенитов второй фазы. Полученные датировки не противоречат геологическим взаимоотношениям многофазной Бургасской интрузии с породами рамы, которые представлены гранитами Гольцового массива (313 млн лет).

Датирование гранитоидов *зазинского* комплекса проводилось по цирконам пр. 023а-04, отобранной из лейкогранитов Унэгэтэйского массива. Цирконы представляют собой призматические кристаллы с желтоватой и коричневатой окраской. Конкордантное значение возраста, полученное по 15 точкам с помощью ионно-зондового метода, составляет 289.2 ± 3.7 млн лет, СКВО = 1.02 [Цыганков и др., 2010]. С помощью LA-SF-ICP-MS метода по 20 точкам получен возраст 290.1 ± 2.8 млн лет при СКВО = 0.36 (см. табл. 3, рис. 8, а).

Геохронологическое изучение *нижнеселенгинского* комплекса проводилось на примере Хасуртинского массива. Из пород Хасуртинского массива были выделены две монофракции цирконов: из амфибол-биотитовых монцититов (пр. Хс-59а) и сиенитов (пр. Хс-55а). Цирконы первой пробы анализировались SIMS и LA-SF-ICP-MS методами. Согласно конкордантному возрасту, полученному по семи точкам на ионном зонде, возраст монцититов Хс-59а определен как 283.7 ± 5.3 млн лет при СКВО = 0.024 [Цыганков и др., 2007а,б]. По данным лазерной абляции и магнитно-секторной масс-спектрометрии, конкордантный возраст цирконов Хс-59а составляет 283.3 ± 2.5 млн лет, СКВО = 1.2 (10 точек) (см. табл. 3, рис. 8, б). LA-SF-ICP-MS определение возраста цирконов пр. Хс-55а дало датировку 279.7 ± 1.9 млн лет при СКВО = 0.77 (17 точек) (см. табл. 3, рис. 8, в), что в пределах ошибки перекрывается с возрастом монцититов.

Цирконы из карбонатов *мезозойского Халютинского месторождения* были представлены Г.С. Риппом. Согласно SIMS определениям, их средневзвешенный конкордантный возраст по $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ отношениям составляет 130 ± 1 млн лет, СКВО = 0.0059 [Рипп и др., 2009]. По данным LA-

Таблица 4.

U-Pb изотопные возраста магматических комплексов Забайкалья

№	Номер пробы	Порода и район отбора пробы	Возраст (LA-ICP-MS), млн лет	Возраст (SIMS), млн лет
<i>Высококальциевые известково-щелочные граниты баргузинского комплекса</i>				
1	Зг-65/1	Биотитовый гнейсогранит Зеленгривского массива, правобережье р. Ангыр (Итанцинский)	323.7 ± 2.1	325.3 ± 2.8*
2	Те-01-06	Порфировидный биотитовый гранит Тэмэнского массива, бассейн р. Курба	316.6 ± 2.3	318 ± 4**
3	Gl-10-03	Слабогнейсовидный биотитовый гранит Гольцового массива, хр. Улан-Бургасы	312.3 ± 2.2	313.3 ± 3**
4	Вг-2-02	Биотитовый гранит, верховья р. Ангыр (Итанцинский)	301.6 ± 2.2	
5	Вг-03-11	Биотитовый гранит, бассейн р. Улюн (правый приток р. Баргузин)	293.2 ± 1.3	
<i>Высококальциевые известково-щелочные низкремнистые гранитоиды чивыркуйского комплекса (кварцевые монзониты, кварцевые сиениты и габброиды)</i>				
6	Хн-62а	Кварцевый монзонит Хангинтуйского массива, правобережье р. Курба	300.1 ± 2.1	302.3 ± 3.7*
7	Вн-113-04	Кварцевый сиенит Бургасского плутона, водораздел хр. Улан-Бургасы	289.7 ± 3.8	287.3 ± 4.1**
8	PR-103а-04	Кварцевый монзонит Бургасского плутона, водораздел хр. Улан-Бургасы	288.8 ± 1.6	
<i>Промежуточные от высококальциевых известково-щелочных до субщелочных граниты и кварцевые сиениты зазинского комплекса</i>				
9	023а-04	Лейкогранит Унэгэтэйского массива, левобережье р. Курба	290.1 ± 2.8	289 ± 2.3**
<i>Шошонитовые монзонит-сиениты нижнеселенгинского комплекса</i>				
10	Хс-59а	Амфибол-биотитовый монзонит Хасуртинского массива, междуречье рек Уда и Курба	283.3 ± 2.5	283.7 ± 5.3*
11	Хс-55а	Сиенит Хасуртинского массива, междуречье рек Уда и Курба	279.7 ± 1.9	
<i>Мезозойский комплекс</i>				
12	Хал-1	Карбонатит Халютинского месторождения стронция и бария, бассейн нижнего течения р. Селенга	131.3 ± 1.1	130 ± 1***

* По [Цыганков и др., 2007а].

** По [Цыганков и др., 2010].

*** По [Рипп и др., 2009].

SF-ICP-MS определений, конкордантный возраст в системе $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ составляет 131.3 ± 1.1 млн лет, СКВО = 2.5 (15 точек) (см. табл. 3, рис. 8, з).

Результаты U-Pb изотопного датирования сведены в табл. 4, на рис. 9 проиллюстрировано, что U-Pb изотопные LA-SF-ICP-MS датировки хорошо совпадают с данными SIMS анализа. Общий коэффициент корреляции позднепалеозой-мезозойских возрастов, полученный разными методами, составляет 0.999, а только позднепалеозойских — 0.994, что еще раз подтверждает достоверность LA-SF-ICP-MS метода датирования.

LA-SF-ICP-MS датирование цирконов из позднепалеозойских гранитоидов подтвердили предшествующие геохронологические данные (см. табл. 4), включающие геологические наблюдения и U-Pb SIMS датирование, — позднепалеозойская магматическая активность началась примерно 330—325 млн лет назад с формирования баргузинских гранитов [Цыганков и др., 2007а,б, 2010, 2012]. Нужно добавить, что полученный U-Pb LA-SF-ICP-MS возраст для цирконов проб Вг-2-02 (301.6 ± 2.2 млн лет) и Вг-03-11 (293.2 ± 1.3 млн лет), с учетом данных В.П. Ковача с авторами [Ковач и др., 2012], позволяет сдвинуть верхнюю возрастную границу формирования гранитов баргузинского комплекса с рубежа 310 до 290 млн лет. В этом случае кристаллизация наиболее молодых баргузинских гранитов во времени существенно перекрываются со становлением гранитоидов чивыркуйского и зазинского комплексов.

Кроме того, полученные данные об одновозрастности монзонитов и сиенитов многофазной Бургасской интрузии (чивыркуйский комплекс) и Хасуртинского массива (нижнеселенгинский комплекс) не только подтверждают возрастную позицию интрузивных комплексов, но и дополнительно удостоверяют геологические данные о сосуществовании монзонитовых и сиенитовых магм и их взаимодействии при становлении этих сложных плутонов [Цыганков и др., 2007; Бурмакина, Цыганков, 2013]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе одноколлекторного магнитно-секторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Element XR (Thermo Scientific) и устройства лазерной абляции UP-213 (New Wave Research) в ГИН СО РАН реализован U-Pb изотопный LA-SF-ICP-MS метод датирования цирконов. На примере U-Pb изотопного датирования эталонных цирконов показано, что прецизионность определения $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ отношений составляет 1—3 %, а правильность определения возраста находится в пределах ошибки 2 % от аттестованного значения.

Сопоставление U-Pb изотопных LA-SF-ICP-MS и SIMS датировок цирконов из позднепалеозойско-мезозойских магматических объектов Западного Забайкалья показало их хорошую сходимость. Также эти результаты в совокупности с новыми данными о возрасте пород баргузинского, чивыркуйского и нижнеселенгинского комплексов, подтверждают существующие представления [Цыганков и др., 2007а, б, 2010, 2012] о продолжительности позднепалеозойского магматического цикла и одновременности формирования гранитоидных комплексов разного состава.

Авторы выражают признательность рецензенту канд. геол.-мин. наук В.Н. Реутскому (ИГМ СО РАН) за конструктивные замечания, а также благодарность лаборатории геохронологии геонаучного агентства Австралии (GA Geochronology Laboratory, Geoscience Australia), Ж. Сламе (J. Sláma) (Department of Earth Science, University of Bergen, Норвегия), А.А. Соболевой и О.В. Удоротыной (ИГ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар) за предоставленные стандартные образцы цирконов, Г.С. Риппу (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ) за цирконы из карбонатитов Халютинского месторождения, Н.В. Васильеву (ФГУП «ИМГРЭ», г. Москва), В.И. Ложкину, Н.В. Брянскому (ИГХ СО РАН, г. Иркутск) и С.В. Палесскому (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) за консультации по разработке и освоению LA-ICP-SF-MS методики.

Статья подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 1405-00498), интеграционного проекта СО РАН № 17 и частично Российского научного фонда (проект № 15-17-10010).

ЛИТЕРАТУРА

Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А. Мафические включения в позднепалеозойских гранитоидах Западного Забайкалья (Бургасский кварцевосиенитовый массив): состав, петрогенезис // *Петрология*, 2013, т. 21, № 3, с. 309—334.

Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Рыцк Е.Ю., Ярмолук В.В., Котов А.Б., Анисимова И.В., Яковлева С.З., Федосеев А.М., Плоткина Ю.В. Длительность формирования Ангаро-Витимского батолита: результаты геохронологических U-Pb исследований // *ДАН*, 2012, т. 444, № 2, с. 184—189.

Костицын Ю.А., Аносова М.О. U-Pb возраст экструзивных пород кальдеры Уксичан в Срединном хребте Камчатки — применение лазерной абляции к датированию молодых цирконов // *Геохимия*, 2013, № 2, с. 171—179.

Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Алакшин А.М., Подладчиков Ю.Ю. Ангаро-Витимский батолит — крупнейший гранитоидный плутон. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1993, 141 с.

Рейф Ф.Г. Физико-химические условия формирования крупных гранитоидных масс Восточного Прибайкалья. Новосибирск, Наука, 1976, 88 с.

Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г., Посохов В.Ф. Возраст карбонатитового магматизма Забайкалья // *Петрология*, 2009, т. 17, № 1, с. 79—96.

Фор Г. Основы изотопной геологии. М., Мир, 1989, 590 с.

Цыганков А.А., Матуков Д.И., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Посохов В.Ф., Цыренов Б.Ц., Хромов А.А., Сергеев С.А. Источники магм и этапы становления позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья // *Геология и геофизика*, 2007а, т. 48 (1), с. 156—180.

Цыганков А.А., Бурдуков И.В., Врублевская Т.Т. Состав и условия образования эндоконтактных сиенитов в Хасуртинском кварцево-сиенит-монцитном массиве, Западное Забайкалье // *Петрология*, 2007б, т. 15, № 2, с. 196—224.

Цыганков А.А., Литвиновский Б.А., Джань Б.М., Рейков М., Лю Д.И., Ларионов А.Н., Пресняков С.Л., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. Последовательность магматических событий на позднепалеозойском этапе магматизма Забайкалья (результаты U-Pb изотопного датирования) // *Геология и геофизика*, 2010, т. 51 (9), с. 1249—1276.

Цыганков А.А., Удоротына О.В., Бурмакина Г.Н., Гроув М. Новые данные U-Pb датирования цирконов и проблема длительности формирования Ангаро-Витимского гранитоидного батолита // *ДАН*, 2012, т. 447, № 2, с. 204—209.

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the

monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards // *Chem. Geol.*, 2004, v. 205, p. 115—140.

Feng R., Machado N., Ludden J. Lead geochronology of zircon by laserprobe–inductively coupled plasma mass spectrometry (LP–ICP-MS) // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, v. 57, p. 3479—3486.

Frei D., Gerdes A. Precise and accurate in situ U-Pb dating of zircon with high sample throughput by automated LA-SF-ICP-MS // *Chem. Geol.*, 2009, v. 261, p. 261—270.

Fryer B.J., Jackson S., Longrich H. The application of laser ablation microprobe–inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM–ICP-MS) to in situ (U)-Pb geochronology // *Chem. Geol.*, 1993, v. 109, p. 1—8.

Gehrels G., Valencia V.A., Ruiz J. Enhanced precision, accuracy, efficiency, and spatial resolution of U-Pb ages by laser ablation–multicollector-inductively coupled plasma mass spectrometry // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, v. 9 (3), doi:10.1029/2007GC001805

Gerdes A., Zeh A. Combined U-Pb and Hf isotope LA-(MC)-ICP-MS analyses of detrital zircons: comparison with SHRIMP and new constraints for provenance and age of an Armorican metasediment in Central Germany // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, v. 249, p. 47—61.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. GLITTER: data reduction software for laser ablation ICP-MS / Ed. P.J. Sylvester. *Laser ablation ICP-MS in the Earth sciences: Current practices and outstanding issues* // Mineral. Assoc. Canada. Short Course, 2008, v. 40, p. 308—311.

Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. The application of laser ablation–inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology // *Chem. Geol.*, 2004, v. 211, p. 47—69.

Košler J., Sylvester P.J. Present trends and the future in geochronology: laser ablation ICPMS / Eds. J.M. Hanchar and P.W.O. Hoskin. *Zircon* // *Rev. Miner. Geochem.*, 2003, v. 53, p. 243—275.

Li X.-H., Liang X., Sun M., Guan H., Malpas J.G. Precise $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age determination on zircons by laser ablation microprobe–inductively coupled plasma-mass spectrometry using continuous linear ablation // *Chem. Geol.*, 2001, v. 175, p. 209—219.

Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M., Katzir Y., Be'eri-Shlevin Y. Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Palaeozoic post-collisional igneous province of Transbaikalia (Russia) // *Lithos*, 2011, v. 125, p. 845—874.

Ludwig K.R. Isoplot 3.0. A geochronological toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochron. Center Spec. Publ., 2003, v. 4.

Moens L., Jakubowski N. The only general method for overcoming spectroscopic interference requires double-focusing instrumentation: Double-Focusing Mass Spectrometers in ICPMS // *Anal. Chem.*, 1998, v. 70 (7), p. 251A-256A.

Simonetti A., Heaman L.M., Chacko T., Banerjee N.R. In situ petrographic thin section U-Pb dating of zircon, monazite, and titanite using laser ablation-MC-ICPMS // *Intern. J. Mass Spectr.*, 2006, v. 253 (1—2), p. 87—97.

Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. Plesovice zircon — A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis // *Chem. Geol.*, 2008, v. 249, p. 1—35.

Stacey J.S., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1975, v. 26 (2), p. 207—221.

Tiepolo M. In situ Pb geochronology of zircon with laser ablation-inductively coupled plasma-sector field mass spectrometry // *Chem. Geol.*, 2003, v. 199, p. 159—177.

Van Achterbergh E., Ryan C.G., Jackson S.E., Griffin W.L. LA-ICP-MS in the Earth sciences — Appendix 3, data reduction software for LA-ICP-MS / Eds. P.J. Sylvester. *Short course* // St. John's Mineral. Assoc. Canada, 2001, v. 29, p. 239—243.

Williams I.S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe // *Rev. Econ. Geol.*, 1998, v. 7, p. 1—35.

*Поступила в редакцию 2 марта 2015 г.,
после доработки — 8 июля 2015 г.*