

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. Н.Л. ДОБРЕЦОВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ГИН СО РАН)

УДК 551.2 (553.04, 556.25)

Пер. № НИОКТР АААА-А21-121011390002-2

Инв. № 2

УТВЕРЖДАЮ
Директор ГИН СО РАН
Д.г.-м.н.
А.А. Цыганков
2022 г.
Протокол № 12 от «22» декабря 2022 г.



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Процессы мантийного-корового взаимодействия при формировании щелочных и гранитоидных комплексов и сопутствующего оруденения восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (промежуточный, 2 этап)

Номер проекта в ИС управления НИР
FWSG-2021-0002 (пер. № 1021062110690-7-1.5.7)

Приоритетное направление 1.5.3.1. Магматические, метаморфические и минералообразующие системы и их эволюция

Руководитель НИР,
директор ГИН СО РАН, д.г.-м.н.

 А.А. Цыганков

Улан-Удэ 2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы

дир., д.г.-м.н.

Цыганков А.А.

(введение, раздел 3, заключение)

Исполнители:

зав. лаб., к.г.-м.н.,

Бурмакина Г.Н.

(раздел 3)

зав. лаб., к.г.-м.н.,

Хубанов В.Б.

(раздел 4)

в.н.с., д.г.-м.н.,

Дорошкевич А.Г.

(раздел 2)

с.н.с.

Посохов В.Ф.

(раздел 4)

с.н.с., к.г.-м.н.,

Рампилов М.О.

(раздел 1)

н.с., к.г.-м.н.,

Ласточкин Е.И.

(раздел 2)

н.с., к.г.-м.н.,

Рампилова М.В.

(раздел 1)

м.н.с.

Буянтуев М.Д.

(раздел 4)

м.н.с.

Хубанова А.М.

(раздел 4)

нормоконтроль

Рампилова М.В.

РЕФЕРАТ

Отчет 32 с., 10 рис., 43 ист., 1 прил.

Ключевые слова: научный отчет, гранитоидный и щелочно-основной магматизм, изотопная геохимия, источники магм и флюидов, редкометалльная минерализация, мафические включения, смешение магм, трековое датирование, Западное Забайкалье.

В результате исследований 2022 года установлен раннепермский U-Pb изотопный возраст щелочных гранитов Ингурского массива (272 млн лет), который характеризует завершающий этап масштабного позднепалеозойского гранитообразования на территории Забайкалья. По своим петрохимическим характеристикам породы Ингурского массива соответствуют гранитам А-типа. Они образовались во внутриплитных условиях в результате плавления докембрийской континентальной коры и последующей дифференциации гранитной магмы с участием мантийной компоненты. Редкометалльная минерализация щелочных гранитов Ингурского массива представлена в основном цирконом, бастнезитом, монацитом, ксенотимом.

Впервые установлены источники магм, U-Pb изотопный возраст, разновидности и условия образования скаполита в габброидах Бамбуйского массива (Витимская щелочная провинция, Северное Прибайкалье). Массив образовался 270 млн лет назад за счет плавления субдукционно модифицированного источника в литосферной мантии, что обусловило повышенное содержание летучих компонентов в расплаве и кристаллизацию одновременно с клинопироксеном и К-полевым шпатом магматического скаполита-I, обогащенного SO₃, Cl и CO₂. Скаполит второго типа (скаполит-II), содержащий включения полевых шпатов и кальцита, образовался за счет контактового взаимодействия габброидов с вмещающими карбонатными породами.

Продолжено изучение мафических включений в гранитоидах Ангаро-Витимского батолита (Западное Забайкалье), Каа-Хемского (Восточная Тува), Калбинского (Восточный Казахстан), Хангайского (Монголия) батолитов, формирование которых было связано с плюмовым процессом, а также мафических включений Магаданского гранитоидного батолита, который формировался в обстановке активной континентальной окраины.

Получены предварительные результаты датирования апатита трековым методом. В целом, исследования 2022 года вносят вклад в расшифровку условий формирования А-гранитов и щелочно-основных пород Витимской провинции и важны для оценки перспектив их промышленного использования.

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Настоящий отчет о НИР составлен с использованием Государственного стандарта (ГОСТ 7.32-2001).

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Ar/Ar – аргон-аргоновый метод изотопного датирования

LA-ICP-MS – аналитический метод - масс-спектрометрия индуктивно-связанной плазмы с лазерным пробоотбором

MME (mafic microgranular enclaves) – мафические микрогранулярные включения

MSWD (СКВО) – средний квадрат отклонений

REE (РЗЭ) – редкоземельные элементы

LREE – легкие редкоземельные элементы

HREE – тяжелые редкоземельные элементы

U-Pb – уран-свинцовый метод изотопного датирования

Nd модельный возраст

Мкм – микрометр

Ап – анортит

КЛ – катодолюминесцентный

MORB – срединно-океанические базальты

LILE – крупно-ионные литофильные элементы

HFSE – высокозарядные элементы

OIB – базальты океанических островов

AFT – трековый анализ апатита

ZFT – трековый анализ циркона

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	6
Основные результаты 2022 года.	
1. Ингурский массив.....	7
2. Бамбуйский массив.....	11
3. Смешение контрастных магм.....	18
4. Датирование апатита трековым методом.....	23
Заключение	26
Список использованной литературы	27
Приложение А	30

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по проекту «Процессы мантийно-корового взаимодействия при формировании щелочных и гранитоидных комплексов и сопутствующего оруденения восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса» в 2022 году были направлены на определение изотопного возраста, геохимических, включая изотопные, характеристик щелочно-основных пород (Бамбуйский массив) и гранитоидов А-типа (Ингурский плутон), расположенных в пределах Витимской щелочной провинции (Западное Забайкалье). Исследования проводились с целью определения геохимических типов источников и механизмы взаимодействия контрастных (мантийных, коровых) магм, оценки вклада процессов мантийно-корового и флюидного взаимодействия в формирование щелочно-основных пород и щелочных гранитоидов, связанной с ними редкометалльной минерализации. Второй составляющей этого направления является продолжающееся изучение процессов смешения контрастных магм (базитовых, гранитоидных) на примере мафических включений из некоторых типов гранитоидов Ангаро-Витимского батолита (Западное Забайкалье), Калбинского батолита Восточного Казахстана, Хангайского батолита Монголии. В сравнительном плане получены первые данные по геологическому положению, петрографии, составу минералов, петро-геохимическим особенностям гранодиоритов Магаданского батолита и содержащихся в них мафических включениях. В отличие от гранитоидов Центральной Азии формирование Магаданского батолита связано с субдукционной геодинамической обстановкой, что, по-видимому, определяет специфику состава как собственно гранитоидов, так и мафического компонента смешения.

В рамках развития U-Pb изотопного метода датирования проведены первые работы по датированию апатита трековым методом.

Таким образом, задачи 2022 года в целом выполнены.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2022 г

1. Ингурский массив

Установлен раннепермский U-Pb изотопный возраст щелочных гранитов Ингурского массива (272 млн лет), который характеризует завершающий этап масштабного позднепалеозойского гранитообразования на территории Забайкалья. По своим петрохимическим характеристикам породы Ингурского массива соответствуют гранитам А-типа. Они образованы во внутриплитных условиях в результате плавления докембрийской континентальной коры и последующей дифференциации гранитной магмы с участием мантийной компоненты. Редкометалльная минерализация щелочных гранитов Ингурского массива представлена в основном цирконом, бастнезитом, монацитом, ксенотимом. Полученные данные расширяют перспективы обнаружения редкометалльной минерализации в позднепалеозойских гранитоидах А-типа в Забайкалье.

В пределах Монголо-Забайкальского региона Центрально-Азиатского складчатого пояса, протяженностью более 2000 км и шириной 150–250 км, известно более 300 массивов, сложенных щелочными гранитами, щелочными и щелочно-полевошпатовыми сиенитами, формировавшимися с ранней перми до средней юры включительно [1-6]. Размеры плутонов, сложенных щелочными гранитоидами, варьируют от первых до сотен и даже тысяч квадратных километров. Небольшие тела, как правило, сложены одним типом пород, тогда как крупные плутоны, такие как Брянский (1600 км²), Хоринский (2000 км²), образовались в результате нескольких последовательных внедрений щелочно-сиенитовых (нордмаркитовых) и щелочно-гранитных магм [7, 8]. Соседний с Ингурским Шербактинский плутон (260 млн лет), сложенный биотитовыми сиенитами и щелочными гранитами (220 км²), сформировался в результате внедрения двух интрузивных фаз, производных единого трахит-трахиандезитового расплава, образованного за счет плавления умеренно-калиевого нижнекорового базитового протолита [9].

Ингурский массив щелочных гранитов и связанное с ним Zr-Nb рудопроявление расположены на левобережье р. Витим на водоразделе с р. Большой Амалат. Массив (рисунок 1) обнажается среди покровов четвертичных базальтов. Породы плутона протягиваются неширокой, около 5 км, полосой в северо-восточном направлении на расстояние примерно 25 км. Обнаженная площадь массива составляет ~100 км². С севера массив ограничен разломом, по которому контактирует с позднепалеозойскими гранитоидами баргузинского комплекса, на юге перекрыт неогеновыми базальтами. Массив имеет зональное строение. Внешнее обрамление представлено щелочными биотит-арфведсонитовыми гранитами, тогда как центральная часть (~40 км²) сложена разномасштабными субщелочными биотитовыми и аляскитовыми гранитами. Переход от

биотитовых к арфведсонитовым гранитам постепенный. Биотитовые граниты представляют собой неравномерно-зернистые породы, в которых наряду с участками крупнозернистого сложения встречаются среднезернистые выделения. Сложены они пертитовым калиевым полевым шпатом (60–80 об. %), кварцем (20–30 об. %), биотитом (до 1–5 об. %), флюоритом. Акцессорные минералы: циркон, титанит, магнетит, рутил, ксенотим, бастнезит. Арфведсонитовые граниты представлены крупно- и равномерно-зернистыми разновидностями с массивной текстурой. Они сложены пертитовым калиевым полевым шпатом (65–70 об. %), кварцем (25–30 об. %), арфведсонитом (5–7 об. %) и биотитом (2–3 об. %). Акцессорные минералы представлены цирконом, рутилом, магнетитом, ильменитом, монацитом, флюоритом, как правило ассоциирующими с темноцветными минералами. Изотопный Ar-Ar возраст арфведсонита составляет 266 млн лет [10]. После открытия Ингурского массива щелочных гранитов и связанного с ним Zr-Nb оруденения, приуроченного к телам шлировых пегматитов, он неоднократно упоминался в различных публикациях [9 - 12], однако специализированное изотопно-геохимическое изучение слагающих его пород практически не проводилось.

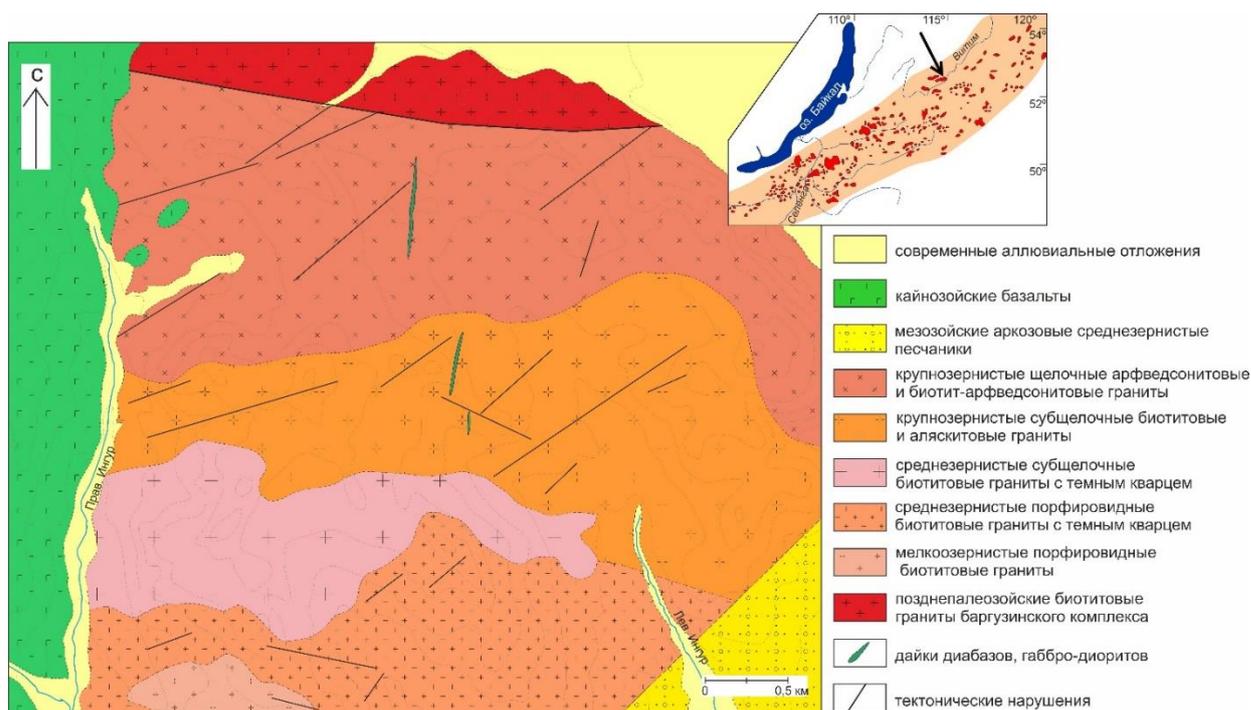


Рисунок 1 – Схема геологического строения Ингурского массива щелочных гранитов (составлена на основе материалов поисково-разведочных работ [13], с дополнениями авторов). На врезке показаны субщелочные и щелочные гранитоиды Монголо-Забайкальской провинции [5], стрелка указывает на Ингурский массив

Содержание кремнезема в гранитоидах массива варьирует от 72 до 77.8 мас. %, составляя в среднем 75.5 мас. %, т.е. практически предельно для пород магматического происхождения. Сумма щелочей составляет 8.5 мас. % (сред.), причем щелочность

увеличивается с уменьшением кремнекислотности; калий преобладает над натрием. Индекс железистости (Fe #) изменяется в узком диапазоне (от 0.90 до 0.97), что характерно для гранитоидов А-типа. Для этих пород характерно высокое содержание тяжелых REE, определяющее низкую величину $La/Yb(n) = 2 - 7$, и отрицательная европиевая аномалия ($Eu/Eu^* \approx 0.17$), указывающая на фракционированный характер рассматриваемых пород. Граниты обеднены Ba, Sr и обогащены Nb, Ta, Zr, Hf, Y, что также является диагностическим признаком А-гранитов, сформированным во внутриплитных условиях, и схожи с щелочными гранитоидами ранне-куналейского комплекса, формировавшихся в период с 280 до 273 млн лет назад [6, 14].

Значения $\epsilon Nd(T)$ в арфведсонитовых, субщелочных гранитах и пегматитах варьирует от -1.99 до -1.49 , что указывает на присутствие корового компонента в источнике исходного расплава. Nd модельный возраст, рассчитанный по двухстадийному варианту, составляет около 1.3 млрд лет, что согласуется с Nd изотопной систематикой коровых магматических протолитов Западного Забайкалья мезоэопротерозойского возраста [4, 8, 15].

Редкометалльная минерализация гранитов Ингурского массива представлена в основном цирконом, бастнезитом, монацитом, ксенотимом. Как правило, они ассоциируют с биотитом и арфведсонитом и образуют мелкие (не более 0.1 мм) одиночные зерна. Бастнезит относится к цериевой разновидности с повышенным содержанием неодима (до 19 мас. % Nd_2O_3 при ~ 30 мас. % Ce_2O_3). Монацит характеризуется присутствием тория (до 13 мас. % ThO_2) и, как и бастнезит, повышенным содержанием неодима (до 20 мас. % Nd_2O_3). Особенностью рутила и ильменита является постоянное присутствие ниобия (до 3 мас. % Nb_2O_5), встречаются они в ассоциации с магнетитом, который характеризуется повышенной титанистостью (вплоть до титаномагнетита). Циркон в гранитах образует зерна и призматические кристаллы размером до 0.2 мм по длинной оси. В нем присутствуют редкие включения торита. Характерной особенностью минерала является присутствие ниобия (до 3 мас. % Nb_2O_5).

Для определения U-Pb изотопного возраста цирконов из арфведсонитовых гранитов Ингурского массива отобрана мономинеральная проба. Цирконы представлены прозрачными короткопризматическими и дипирамидальными кристаллами размером 150–300 мкм с выраженной магматической осцилляционной зональностью, наблюдаемой в катодоллюминесцентном изображении (рисунок 2а). Отношение $Th/U=0.33-0.97$, что соответствует цирконам магматического происхождения. Средневзвешенный возраст, рассчитанный по отношению $^{206}Pb/^{238}U$, составляет 272.0 ± 3.9 млн лет, $MSWD=0.57$ (рисунок 2б).

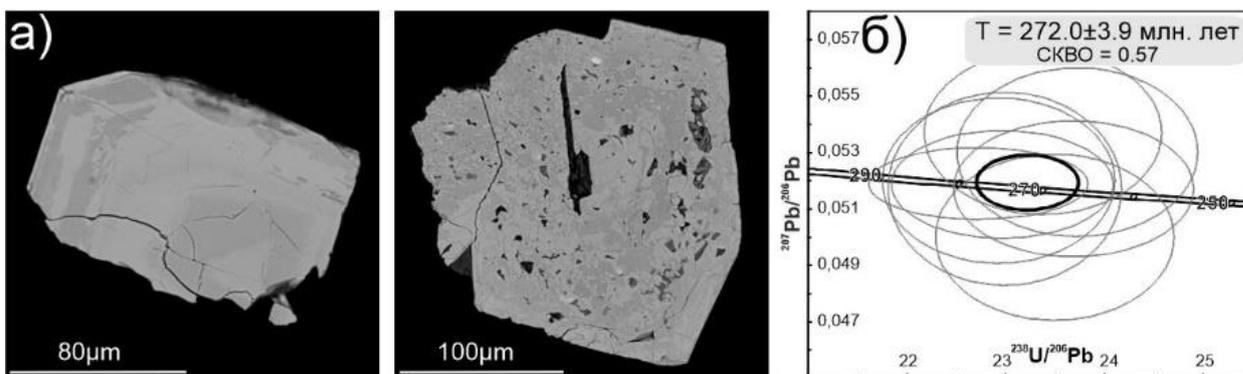


Рисунок 2 – Морфология зерен циркона из арфведсонитовых гранитов. (а) – изображения в обратнорассеянных электронах; (б) – диаграмма с конкордией в координатах $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ – $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$

Полученный возраст соответствует завершающему позднепалеозойскому этапу длительного внутриплитного гранитного магматизма [8, 14].

В результате проведенных исследований установлен раннепермский U-Pb изотопный возраст щелочных гранитов Ингурского массива (272 млн лет), который характеризует завершающий этап масштабного позднепалеозойского гранитообразования на территории Забайкалья. По своим петрохимическим параметрам породы Ингурского массива соответствуют гранитам А-типа. Они образованы во внутриплитных условиях в результате плавления докембрийской континентальной коры и последующей дифференциации гранитной магмы с участием мантийной компоненты. Редкометалльная минерализация щелочных гранитов Ингурского массива представлена в основном цирконом, бастнезитом, монацитом, ксенотимом.

Rampilova M.V., Rampilov M.O., Izbrodin I.A. Compositional Features and Age of Alkaline Granites of the Ingur Massif, Western Trans-Baikal Area//Geodynamics & Tectonophysics. – 2022. – Vol. 13 (4), 0647. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0647

2. Бамбуйский массив

Впервые установлены источники магм, U-Pb изотопный возраст, разновидности и условия образования скаполита в габброидах Бамбуйского массива (Витимская щелочная провинция, Северное Прибайкалье). Массив образовался 270 млн лет назад за счет плавления субдукционно модифицированного источника в литосферной мантии, что обусловило повышенное содержание летучих компонентов в расплаве и кристаллизацию одновременно с клинопироксеном и К-полевым шпатом магматического скаполита-I, обогащенного SO₃, Cl и CO₂. Скаполит второго типа (скаполит-II), содержащий включения полевых шпатов и кальцита, образовался за счет контактового взаимодействия габброидов с вмещающими карбонатными породами.

Полученные данные вносят вклад в расшифровку условий формирования щелочно-основных пород Витимской провинции и важны для оценки перспектив их промышленного использования.

Бамбуйский массив располагается в центральной части позднеопротерозойского Байкало-Муйского вулканоплутонического пояса в бассейне р. Бамбуйка примерно в 70 км выше ее впадения в р. Витим (рисунок 3). Массив прорывает карбонатные отложения нижнего-среднего кембрия и приурочен к пересечению субширотных и северо-западных разломов. Согласно [16], формирование Бамбуйской интрузии происходило в одну фазу, однако первичная дифференциация магмы и широкое развитие процесса магматического замещения привели к образованию пород различного состава, составляющих Западную и Восточную интрузии, разделенные долиной р. Бамбуйки. Общая площадь массива составляет 15 км².

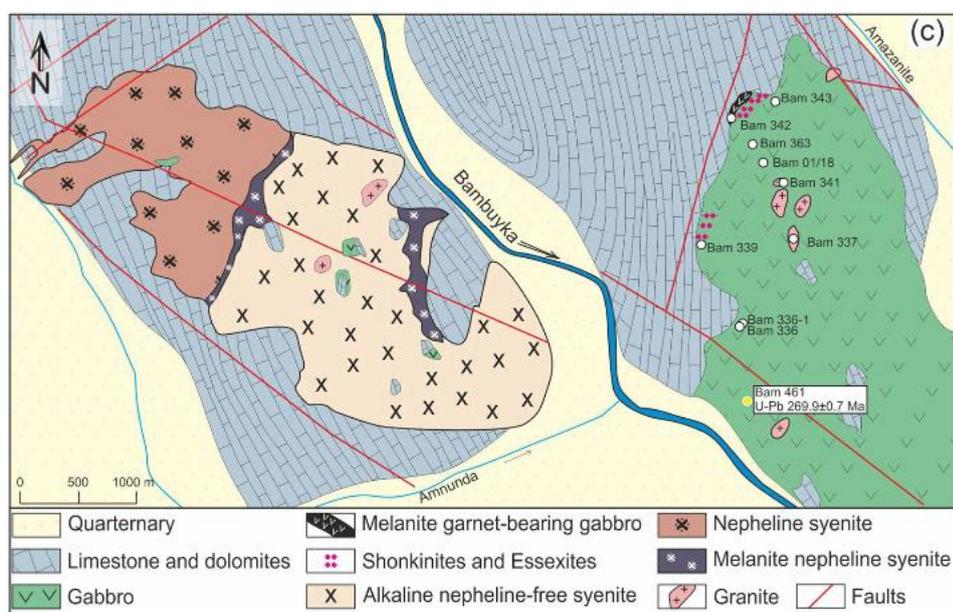


Рисунок 3 – Схематическая геологическая карта Бамбуйской интрузии (по [16] с изменениями)

Западная интрузия состоит в основном из щелочных сиенитов, содержащих тонкие «прослои» нефелинсодержащих сиенитов с постепенными переходами между ними. В эндоконтактной зоне вблизи известняков широко распространены гранатсодержащие щелочные сиениты, содержащие ксеноблоки карбонатов, окруженные каймой шонкинитов и габбро шириной не более нескольких метров.

Восточная интрузия размером 6 x 1.8 км сложена габброидами, габбро-диоритами, пироксенитами и габбро-пироксенитами постепенно переходящими друг в друга. Необычной особенностью габброидов является присутствие скаполита, количество которого достигает 30 – 40 об. %. По количеству скаполита породы подразделяются на скаполитовые габбро (до 40 об. % скаполита), приуроченные к краевым частям массива, и скаполит-содержащие габбро, в которых количество скаполита составляет 10 – 15 об. %. Габбро содержат варьирующее количество клинопироксена (25 – 30 %), амфибола (5 – 15 %) и плагиоклаза ($Ап_{35-70}$) (10 – 40 %). Биотит, К-полевой шпат, апатит, бадделеит, циркон, цирконолит, магнетит, ильменит, рутил, титанит, пирит, кальцит, доломит присутствуют как второстепенные и акцессорные минералы. Структура пород гипидиомофная, офитовая, текстура массивная. В непосредственной близости от контакта с известняками габбро становится заметно крупнозернистее, приобретают пойкилофитовую структуру. Количество скаполита на этих участках увеличивается до 30 – 45 %. В дальнейшем такие породы будем называть скаполитовыми габбро в противоположность скаполит-содержащим габбро (10 – 15 % скаполита) внутренних частей массива.

Скаполит в скаполит-содержащем и скаполитовом габбро занимает промежутки между амфиболом и клинопироксеном, реже между амфиболом и полевым шпатом в виде неправильных, неправильно-табличных зерен размером до 5 мм по длинной оси. Электронно-микроскопическими исследованиями выявлены значительные различия в составе скаполита из скаполитовых и скаполит-содержащих габбро (рисунок 4). С точки зрения химического состава можно выделить две группы минералов скаполита. Первая (скаполит-I) характерна для скаполит-содержащих габбро. Состав скаполита-I соответствует натриевому мейониту (рисунок 4), в котором позиция *M* занята в основном Са и Na с полным отсутствием К. Содержание мейонитового компонента составляет 49.6 – 65.4. Позиция *T* занята Si и Al, а позиция *A* – CO₃, Cl и SO₃.

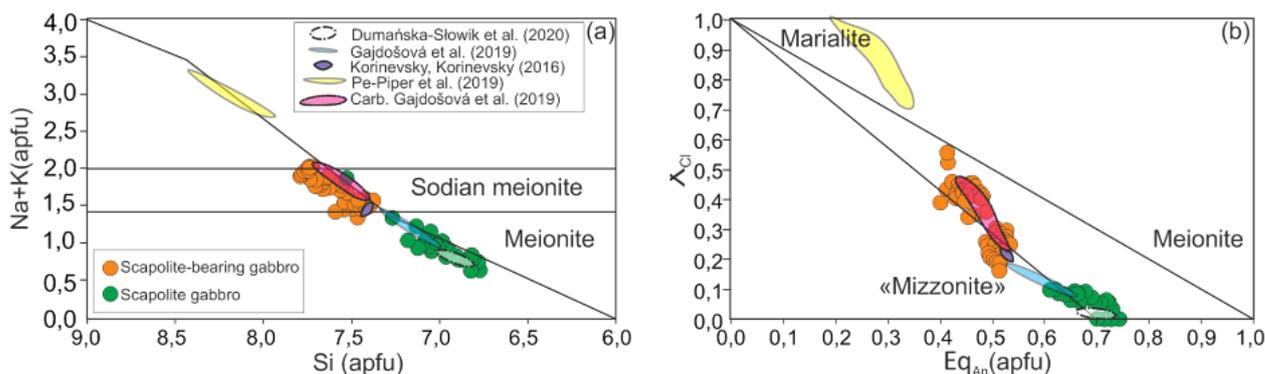


Рисунок 4 – Диаграммы, иллюстрирующие состав скаполита-I из габброидов внутренней и скаполита-II краевой частей Бамбуйской интрузии (a, b)

Вторая группа (скаполит-II) представлена скаполитом, в значительной степени обогащенным мейонитом и характерна для скаполитовых габбро, которые широко распространены в приконтактных зонах. Скаполит, богатый мейонитом, образует неправильные таблитчатые зерна длиной до 10 мм и агрегативные сегрегации (до 2 см) и часто замещает полевой шпат. Содержание мейонита в скаполите этого типа составляет 73 – 84.

Зерна циркона из скаполитосодержащего габбро варьируют по размеру от 70 до 150 мкм, имеют удлиненную призматическую форму (рисунок 5) с осцилляторной зональностью, хорошо видимой на катодолуминесцентном изображении. Точки изотопного состава циркона из согласующегося кластера дают возраст 270 ± 1 млн лет (MSWD=2.7, n=36), который интерпретируется как возраст кристаллизации габброидов.

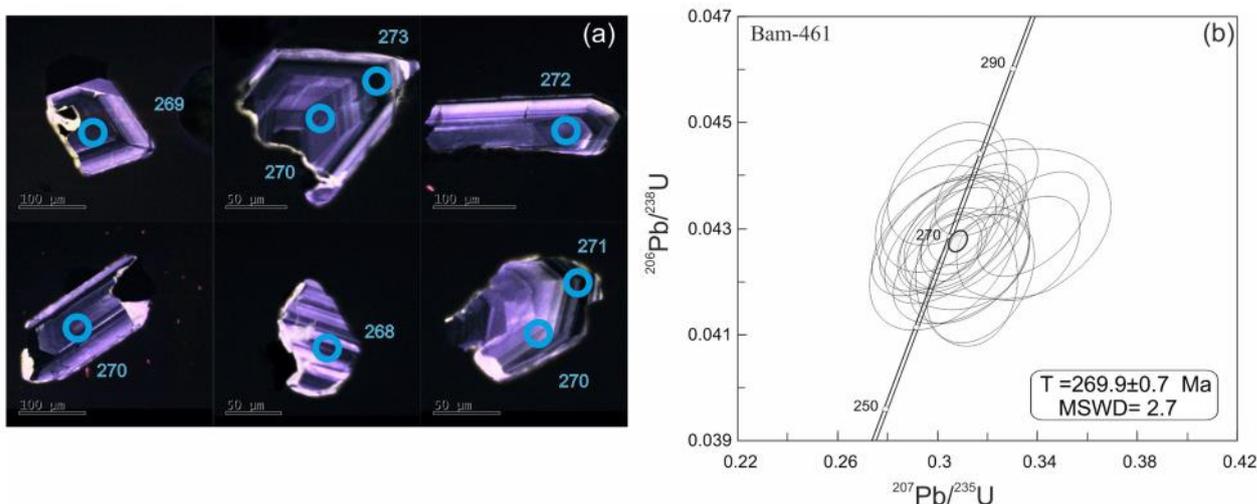


Рисунок 5 – КЛ-изображение цирконов из скаполит-содержащего габбро (a) и U-Pb диаграмма с конкордией для цирконов из габбро

Состав пород Бамбуйского массива отвечает габброидам и пироксенитам нормального и щелочного ряда (рисунок TAS). Типичные габбро содержат до 4 %

нефелина и 6 – 10 % оливина. Для габброидов характерно низкое содержание SiO_2 (39 - 47 мас. %) и варьирующее количество Al_2O_3 (8 – 19 мас. %), CaO (12 – 22 мас. %), P_2O_5 (0.11 – 2.0 мас. %) и щелочей (до 8 мас. %). Отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ составляет 2 – 4.5, магнезиальность (Mg#) варьирует от 40 до 73.

Скаполитовые и скаполит-содержащие габбро характеризуются сходным распределением REE ($\text{La}/\text{Yb}_{(n)} = 6-20$; $\text{Gd}/\text{Yb}_{(n)} = 3-5$). Европиевая аномалия отсутствует. Мультиэлементные спектры пород, нормированные по примитивной мантии, демонстрируют отрицательные аномалии Nd-Ta, Pb, Zr-Hf и Ti.

Приведенные выше петрографические и минералогические данные показывают, что в изученных габбро присутствуют два типа скаполита. Первый тип относится к натриевому мейонитовому скаполиту, имеет магматическое происхождение и, вероятно, кристаллизовался примерно в то же время, что и плагиоклаз и барийсодержащий K-полевой шпат. В натриевом мейонитовом скаполите нет реликтов плагиоклаза и нет реакционных структур скаполит-плагиоклаз. Большинство плагиоклазовых зерен, сосуществующих со скаполитом в скаполитсодержащем габбро, имеют сходный химический состав An_{48-50} , в то время как скаполит более натриевый и соответствует составу мейонита (Me_{61-65}). Минерал содержит редкие включения из цирконолита и пирротина. Считается, что скаполит, как первичная магматическая фаза, кристаллизуется при высоких температурах (выше 850°C) и при повышенных давлениях (3-6 кбар) [17, 18]. Ключевым фактором, способствующим образованию первичного скаполита, является высокий уровень CO_2 и/или активность SO_4 [19] в расплаве. Возможным объяснением этого явления могло бы быть взаимодействие базитового расплава с карбонатными породами в континентальной коре до внедрения и кристаллизации.

Карбонаты разлагаются под воздействием температуры, высвобождая CO_2 , который частично растворяется в расплаве. Экспериментально доказано, что щелочные базальты растворяют в 1,7 раза больше CO_2 , чем базальты с низким содержанием щелочей, и в 2 раза больше, чем MORB [20]. Продуктами такого взаимодействия между равными массовыми долями чистого кальцита (CaCO_3) и базальтового расплава будут расплав + жидкость + кальцит + срх ± плагиоклаз ± кальциевый скаполит ± шпинель [21].

Второй тип, относящийся к мейонитовому скаполиту, встречается в ассоциации с кальцитом, в зоне контакта габбро с вмещающими его карбонатными породами. Первичный магматический плагиоклаз практически не сохранился и был найден в виде реликтовых одиночных зерен или в агрегатах с амфиболом и клинопироксеном в скаполите. Состав реликтового плагиоклаза колеблется от An_{37} до An_{50} . Возможной реакцией образования скаполита в этом типе породы может быть плагиоклаз + кальцит +

Cl-содержащий флюид = скаполит [22]. Этот скаполит имеет более высокое содержание Ca (73-84 Me %) по сравнению с первым типом и попадает в область, характерную для скаполитовых минералов из карбонатно–силикатных пород месторождения Эват [23] и габбро щелочного комплекса Чо-Дон, для которого рассматриваются метасоматическое [24] и магматическое происхождение [25]. Наиболее вероятно, что образование этого типа скаполита произошло во время внедрения и кристаллизации Бамбуйского массива.

Полученный возраст габбро Бамбуйской интрузии (269.9 ± 0.7 млн лет), вместе с опубликованными данными по позднепалеозойскому базитовому магматизму Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского орогенного пояса (САОВ) [5, 8, 14, 26, 27, 28], позволяет сделать вывод, что базитовый магматизм имел место 290 – 270 млн лет назад. Следует отметить, что формирование мафических пород связано с основной стадией формирования позднепалеозойских (315 -280 млн лет) щелочных пород Витимского и Северо-Байкальского сегментов Западного Забайкалья [29 - 36]. В этот период также формировались гранитоиды Ангаро-Витимского батолита, занимающие большую часть Западного Забайкалья и нередко содержащие мафические включения и минглинг-дайки [37].

Важно отметить, что пик магматической активности (275 млн лет), проявляющийся в скоплениях мафических даек, был выделен на южной окраине Сибирского кратона, примыкающей к району исследования [38]. Полученный возраст указывает на то, что формирование Бамбуйской интрузии произошло в результате внедрения магмы вдоль ослабленных зон в условиях тектонического растяжения в постколлизийный период на последней стадии кристаллизации Ангаро-Витимского гранитного батолита и его последующего охлаждения.

Габбро Бамбуйской интрузии характеризуются отрицательным $\epsilon\text{Nd}(T)$ и довольно высоким значением первичного отношения $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ (>0.707), и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i = 17.434$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i = 15.472$ (рисунок 6). Породы также показывают положительные аномалии Ba и Sr и отрицательные аномалии Nb–Ta и Ti. Такие изотопные и геохимические характеристики пород предполагают контаминацию материалом земной коры или присутствие субдупцированного компонента в источнике. Геологические наблюдения показывают, что габбро действительно взаимодействовало с вмещающими карбонатными осадочными породами, что подтверждается и данными по изотопному составу кислорода.

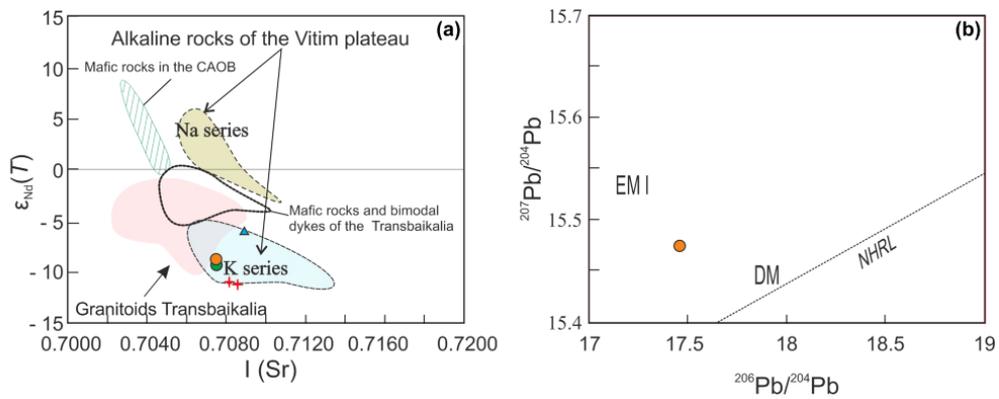


Рисунок 6 – Изотопный состав Nd, Sr, Pb в породах Бамбуйского массива. Для сравнения показаны области изотопных составов щелочных пород Витимской провинции, мафических пород Центрально-Азиатского складчатого пояса и позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья

С другой стороны, незначительные различия в значениях Sr–Nd для всех разновидностей габбро, сходная конфигурация графиков распределения REE и микроэлементов с аналогичным диапазоном значений предполагает, что взаимодействие с вмещающими карбонатными породами не привело к значительному изменению геохимических и изотопных характеристик габброидов.

На рисунке 7 геохимические параметры габброидов Бамбуйской интрузии представлены в виде соотношений Th/Yb - Nb/Yb [39]. Точки смещены в сторону более высоких соотношений Th/Yb относительно области мантийных значений. Обогащение по отношению к Nb может быть связано либо с контаминацией, либо с участием субдуцированного материала в источнике.

Хотя последствия контаминации и влияние субдуцированного материала аналогично, наблюдаются значительно более высокие значения Th/Yb в породах Бамбуйской интрузии что, по нашему мнению, вряд ли связано исключительно с контаминацией. В этом случае Th/Yb и Ta/Yb должны положительно коррелировать с содержанием SiO₂ в контаминированной магме, однако этого не наблюдается.

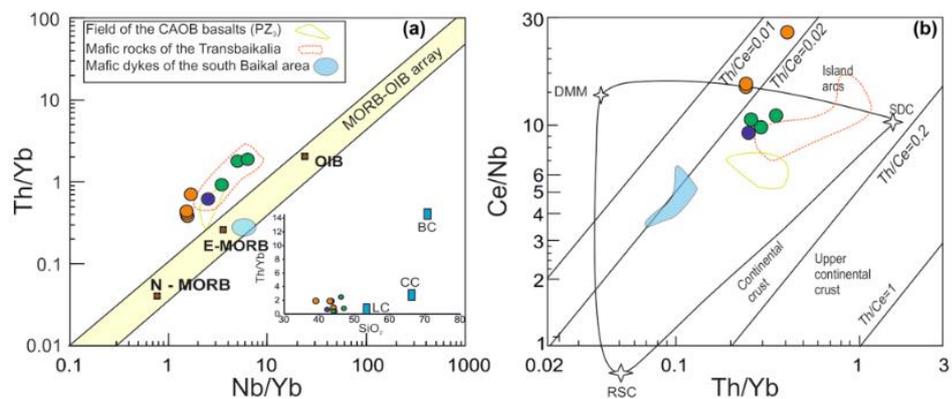


Рисунок 7 – Соотношение Nb/Yb – Th/Yb (a) и Th/Yb – Ce/Nb (b) в габброидах Бамбуйского массива

Это значит, что более высокие соотношения Th/Yb по сравнению с мантийным рядом, скорее всего, являются характеристикой источника, содержащего субдущированный компонент. Кроме того, $(Th/La)_{PM}$ в габбро Бамбуйской интрузии составляет <1 (0.3–0.6). Этот факт не позволяет рассматривать контаминацию коровым материалом в качестве вероятного процесса, поскольку породы континентальной коры характеризуются соотношением $(Th/La)_{PM}$ всегда >1 . Соответственно, в основных расплавах, контаминированных континентальной корой, это соотношение также должно быть больше единицы.

Важно отметить, что значения Th/Yb и Nb/Yb в породах Бамбуйской интрузии попадают в диапазон значений, установленный для основных пород Забайкалья и Южной Монголии, отражающих важную роль метасоматизированного мантийного клина в источнике магм [40].

Представленные выше данные, в совокупности с опубликованными ранее, позволяют предположить наличие плюмового материала в источнике позднепалеозойских мафических пород Забайкалья [26].

Таким образом, можно сделать следующие основные выводы:

1. Формирование габбро Бамбуйского массива произошло 270 млн лет назад, на начальной стадии позднепалеозойской магматической активности Западного Забайкалья.

2. Габброиды Бамбуйского массива содержат две разновидности скаполита: первый тип - это натриевый мейонит, обогащенный SO_3 , Cl и CO_2 , образовавшийся на магматической стадии одновременно с клинопироксеном и K-полевым шпатом. Второй тип - скаполит широко распространен в зонах контакта габбро с вмещающими карбонатными породами. Этот скаполит содержит включения полевых шпатов, кальцита и образовались при контакте с вмещающими карбонатными породами во время формирования и кристаллизации Бамбуйской интрузии.

3. Геохимические и изотопные характеристики габбро объясняются вкладом литосферной мантии, модифицированной субдущированным материалом.

Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Rampilov M.O., Lastochkin E.I., Savatenkov V., Posokhov V., Khubanov V., Redina A.A. Age and petrogenesis of scapolite gabbro from the Bambuy intrusion (Vitim plateau, Russia) and their tectonic significance//International Journal of Earth Sciences. – 2022. – Vol. 111 (6). P. 1859-1883. doi.org/10.1007/s00531-022-02202-4

3. Смещение контрастных магм

Мафические включения (ММЕ - mafic microgranular enclavs), встречающиеся в гранитоидах разного состава, представляют собой одно из наиболее ярких свидетельств сосуществования и взаимодействия мантийных базальтовых и салических магм (независимо от происхождения последних). Принципиальное отличие ММЕ от любых других типов меланократовых включений заключается в том, что они являются раскристаллизованными «каплями» диспергированного базальтового расплава поступавшего в камеру кристаллизации одновременно с кислой магмой. Следовательно, мафические включения являются прямым и наиболее надежным доказательством сосуществования и взаимодействия базитовых и салических магм при формировании гранитоидных plutонов, поддерживая идею о важной роли мантийных магм, как источников дополнительного тепла, необходимого для масштабного корового плавления.

ММЕ наиболее характерны для гранитоидов связанных с субдукционной геодинамической обстановкой, классическим примером которых является батолит Сьерра-Невада [41], а также для гранитоидов связанных с мантийными плюмами и не характерны для обстановки континентальной коллизии, как например миоценовые лейкограниты Высоких Гималаев [42], или позднеюрско-раннемеловые гранитоиды Главного Колымского батолитового пояса.

Нами с разной степенью детальности изучены мафические включения в гранитоидах Ангаро-Витимского батолита (Западное Забайкалье), Каа-Хемского (Восточная Тува), Калбинского (Восточный Казахстан), Хангайского (Монголия), формирование которых было связано с плюмовым процессом, а также ММЕ Магаданского гранитоидного батолита, который формировался в обстановке активной континентальной окраины. Целью данного сообщения является сравнительный анализ процессов смешения магм в гранитоидах разных геодинамических обстановок.

В целом мафические включения характерны для гранитоидов повышенной основности - кварцевых монзонитов, кварцевых сиенитов и кварцевых диоритов и не характерны для собственно гранитов и лейкогранитов.

Принято считать [41], что мафические включения представляют собой диспергированные «капли» интенсивно гибридного базальтового расплава, причем его гибридизация происходила не *in situ*, а в промежуточной камере или на пути движения транспортирующего салического расплава к поверхности.

Характер распределения ММЕ внутри отдельных массивов различен. В одних случаях (Бургасский, Романовский массивы, Ангаро-Витимского батолита (АВБ), Каа-Хемский массив Восточной Тувы) включения относительно равномерно распределены по

всему массиву или на значительной его части, где их количество варьирует от нескольких штук до $1.5 \cdot 10^{-2}$ десятков на m^2 . В других, ММЕ концентрируются на отдельных локальных (по сравнению со всей площадью массива) участках (первые сотни метров в поперечнике), где на фоне более или менее равномерного распределения встречаются «рои», в которых на долю включений приходится более 50 % общего объема.

Морфология и размеры ММЕ не сильно различаются в разных массивах. Средний поперечный размер составляет 10-15 см, при вариациях от долей см до 0.5 м (иногда более), форма чаще всего округлая, эллиптическая, реже ближе к угловатой, но с очень плавными закругленными контурами, еще реже – неправильная «амёбообразная» (более характерна для вулканических образований). Нередко наблюдается (Романовский массив – Западное Збайкалье, Каа-Хемкий массив – Восточная Тува) закономерная субпараллельная ориентировка резко удлинённых линзовидных ММЕ, по-видимому наследующих структуру конвективных течений в интрузивной камере, или, что менее вероятно, отражающая субсолидусные пластические деформации. Морфология и распределение ММЕ в Магаданском гранитоидном батолите резко отличается от рассматриваемых выше. Здесь мафические включения образуют гигантскую зону видимой протяженностью в несколько сотен метров с вертикальным размахом обнажений в несколько десятков метров. ММЕ в этой зоне составляют более половины от общего объема породы, их размер достигает первых метров по длинной оси. Форма, как правило, вытянутая, часто со сложными очертаниями, овальная, почти круглая.

Сильно гибридизированные ММЕ (кварцевые сиениты, кварцевые монцониты, рисунок 8), которые по нашим наблюдениям встречаются чаще всего, представляют собой тонко- или мелкозернистые меланократовые амфибол-биотит-полевошпатовые породы монцодиоритового, монцонитового и кварцевомонцонитового состава, обычно содержащие вкрапленники полевых шпатов.

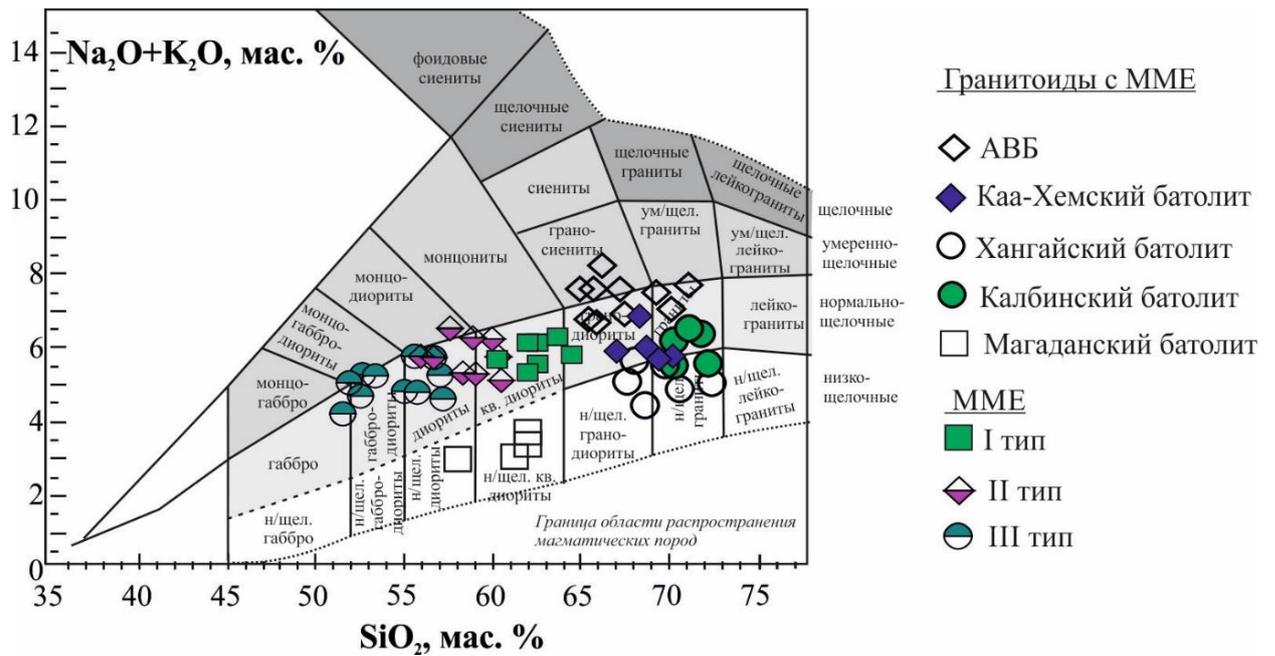


Рисунок 8 – Соотношение $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (мас. %) в мафических включениях и вмещающих гранитоидах

Включения базальтового состава в гранитоидах редки, например, массив Тастау (Восточный Казахстан), однако реликтовые ассоциации минералов (основной плагиоклаз, пироксен, рисунок 9) и некоторые геохимические характеристики указывают на то, что и в других случаях мафический компонент смешения имел базальтовый состав.

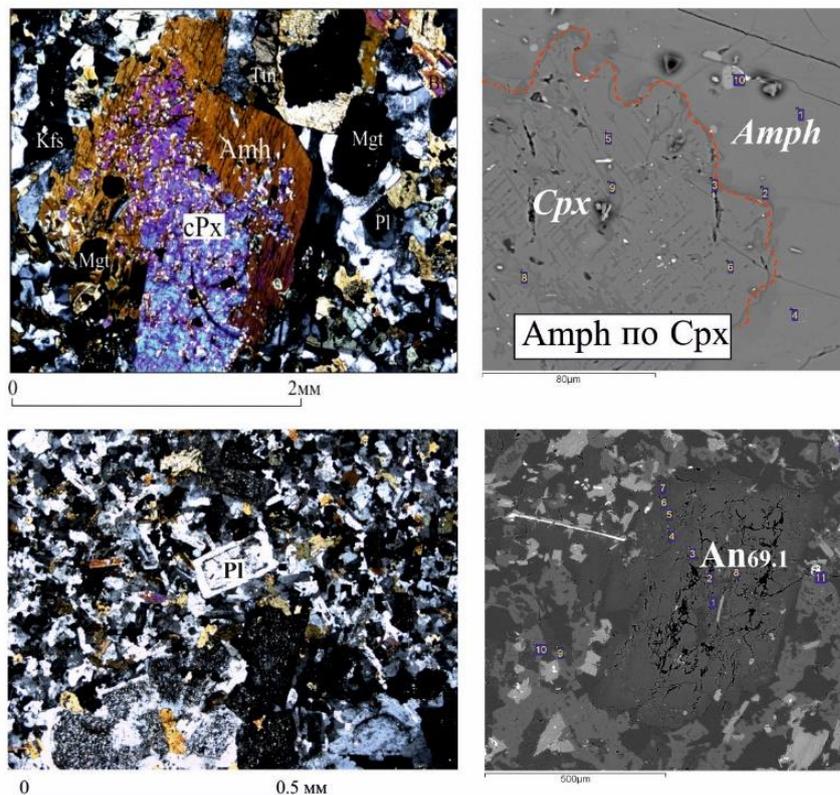


Рисунок 9 – Реликтовые минеральные ассоциации в мафических включениях. Pl – плагиоклаз, Amph – амфибол, Cpx – клинопироксен, An – анортит.

В Магаданском батолите компоненты смешения различаются не столь контрастно. Мафические включения имеют в целом андезитовый или андезибазальтовый состав в отличие от исходно базальтоидного, характерного для внутриплитных гранитоидов связанных с мантийными плюмами.

Химический состав ММЕ, включая микроэлементный, сильно зависит от степени гибридизации, однако ряд геохимических характеристик, установленных на примере Бургасского, Улекчинского массивов АВБ и Преображенского массива Восточного Казахстана сближают их с внутриплитными базальтами ОІВ типа (рисунок 10). Для ММЕ характерна обогащенность LILE элементами относительно HFSE, при более высоких концентрациях LILE но, в отличие от ОІВ, ММЕ имеют резкий Ta-Nb минимум, характерный для всех позднепалеозойских базитов, связанных в пространстве и времени с АВБ. В тоже время, повышенные содержания Sr и Pb отражают взаимодействие с коровыми расплавами. Химический состав ММЕ из Магаданского гранитоидного батолита характеризуется относительно низкими содержаниями LILE.

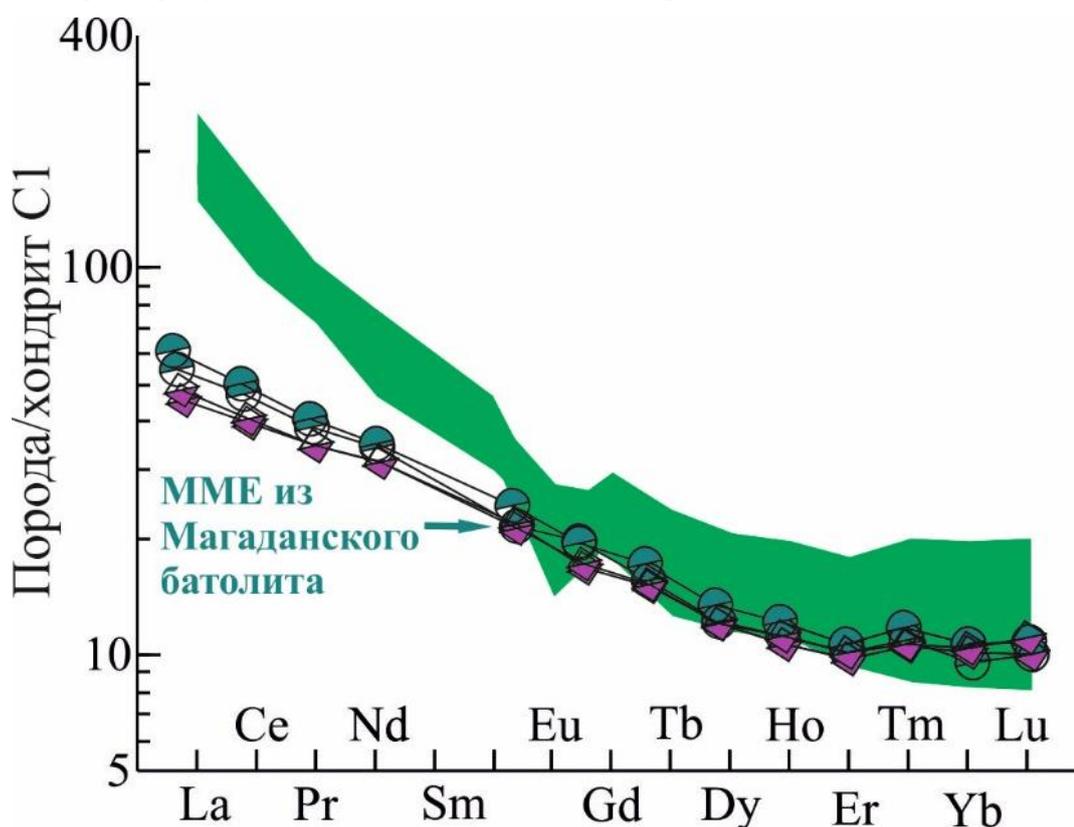


Рисунок 10 – Распределение REE в мафических включениях внутриплитного (Забайкалье, Казахстан) и конвергентного (Магаданский батолит) типов

Таким образом, представленные материалы позволяют сделать вывод, что процессы смешения магм в гранитоидах внутриплитного (плюмового) и конвергентного (АКО) типов существенно различаются как масштабами проявления, так и исходным

составом компонентов смещения, отражающих специфику магматизма этих геодинамических обстановок.

Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А. Мафические включения в гранитоидах разных геодинамических обстановок // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022. М-лы ЛП Тектонического совещания. Т.1. М.: ГЕОС. 2022. С. 76-79.

4. Датирование апатита трековым методом

Трековый анализ апатита (apatite fission-track, AFT) и циркона (zircon fission-track, ZFT) являются методами низкотемпературной термохронологии и активно используются исследователями в области наук о Земле для решения задач геотектоники, геодинамики, реконструкции тепловой истории осадочных бассейнов, отдельных магматических тел и крупных блоков земной коры, оценки геотермального градиента в прошлом. Ключевая особенность трекового анализа заключается в том, что он позволяет оценить время, прошедшее с момента остывания породы ниже $\sim 110^{\circ}\text{C}$ (apatит) или $\sim 240^{\circ}\text{C}$ (циркон), а также реконструировать её термальную эволюцию в интервале $110-60^{\circ}\text{C}$ (apatит) или $240-110^{\circ}\text{C}$ (циркон).

Ключевыми этапами трекового анализа являются подсчет плотности, длин и диаметров треков спонтанного деления изотопа ^{238}U , а также определение его концентрации. Для измерения концентрации урана в минерале могут быть использованы два подхода – традиционный метод внешнего детектора (External Detector Method, EDM) и лазерная абляция с индуктивно-связанной плазмой (LA-ICP-MS). Применение последнего для целей трекового датирования началось около 20 лет назад, но, насколько известно авторам, в России подход с LA-ICP-MS до сих пор не реализован.

При сотрудничестве Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и Геологического института им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения РАН была адаптирована и реализована методика LA-ICP-MS трекового датирования апатита (apatite fission-track dating).

Подсчет плотностей, диаметров треков и длин скрытых треков выполнялись в Центре коллективного пользования (ЦКП) Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва) вручную на микроскопе Olympus VX53M, оборудованного цифровой камерой высокого разрешения и прецизионным ручным XY-столиком, под объективом 100x и общем увеличении 1000x.

Измерение концентрации урана выполнялось в ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ) на масс-спектрометре высокого разрешения ICP-MS Element XR с установкой лазерной абляции UP-213 NewWave по протоколу [43]. Экспериментальным путем были подобраны параметры настроек масс-спектрометра и лазерной приставки, которые приведены в таблице 1. Настройка проводилась с помощью измерения масс 238 (уран) и 232 (торий) в стекле NIST 610 в режиме Tune. Параметры считались оптимальными если отношение U/Th было близко к единице в стекле, а ThO/Th было ниже 0.15. При этом диапазон масс непрерывного E-

scan сканирования был настроен на 30 % от значения наименьшей атомной массы, на которой стабилизировалась позиция магнита.

Таблица 1 – Параметры настроек оборудования LA-ICP-MS для трекового датирования апатитов

Лазерная абляция	
Тип лазера	Nd-YAG
Производитель / модель	New Wave Research / UP-213
Длина волны излучения	213 нм
Размер пучка излучения	40 мкм
Частота импульсов	10 Гц
Время прогрева лазера	20 с
Время лазерного испарения	30 с
Время продувки лазерной камеры	30 с
Масс-спектрометр	
Тип масс-спектрометра	Магнитно-секторный
Производитель / модель	Thermo Scientific / Element XR
Энергия ионизации	1175 Вт
Газовые потоки:	
Охлаждающий (Ar)	16 л/мин
Вспомогательный (Ar)	1.2 л/мин
Транспортный (He)	1.2 л/мин
Пробоподающий (Ar)	0.9 л/мин
Разрешение	Низкое
Режим сканирования	E-scan
Мертвое время детектора (Dead Time)	22 нс
Метод измерения:	
Измеряемые массы (изотопы)	34, 35, 43, 55, 137, 139, 140, 141, 146, 147, 153, 157, 159, 163, 165, 166, 169, 172, 175, 206, 208, 232, 238
Режим регистрации сигналов	Тройной (triple) режим – для масс 34 и 43, режим счета (Counting) – для других масс
Окно сканирования массы (Mass Windows)	4% – для 43 и 238; 2% – для остальных масс
Время задержки магнита (Settling Time)	0.1 с – для 34; 0.01 с – для 55, 137, 206; 0.001 с – для других массы
Время измерения (Sample Time)	0.001 с для всех масс;
Количество сигналов в пике (Samples Per Peak)	100 – для каждой массы
Способ интегрирования сигнала (Integration Type)	Среднеарифметический
Количество сканирований при одном измерении (Runs)	400
Общее время сканирования	1 мин 20 с

Главными критериями для создания метода масс-спектрометрического анализа были выраженность сигналов ^{43}Ca и ^{238}U при испарении апатитов и эталонного стекла, а также общее время сканирования, которое должно было составлять менее 1.5 мин. Последнее условие обусловлено временем работы лазера и продувки системы. Внешним стандартом служило эталонное стекло NIST 610 и эталонный апатит Durango, в качестве внутреннего стандарта использовалось содержание кальция (CaO 11.45 мас. % в NIST 610 и 54 мас. % в апатитах). Первичная обработка данных масс-спектрометрического анализа проводилась с помощью программы Glitter. Программа производит фильтрацию и выделение оптимального сигнала, вычитание фона, коррекцию на инструментальный дрейф, дискриминацию и фракционирование изотопов (масс).

Оптимизированная методика была апробирована на примере геохронометрии апатитов двух интрузивных тел Сибирской пермо-триасовой трапповой провинции: щелочно-ультраосновного плутона Маган и Контайской интрузии. Результаты трекового анализа, выполненного по принципу «образец-в-образец» классическим методом внешнего детектора (EDM) и методом LA-ICP-MS в модификации зета-калибровки, совпадают в пределах погрешности метода: плутон Маган – 215 ± 18 (LA-ICP-MS) и 201 ± 19 (EDM); интрузия Контайская – 143 ± 22 (LA-ICP-MS) и 173 ± 13 (EDM).

Таблица 2 – Результаты трекового датирования с применением LA-ICP-MS

	Интрузив	№	LA-ICP-MS				EDM		
			Кол-во зерен	Плотность треков ($\times 10^6$ треков см^{-2}) (Число треков)	Содержание урана (ppm)	$\zeta_{\text{ICP}} \pm 2\sigma$	Возраст (млн. лет) ($\pm 2\sigma$) (Pooled age)	Содержание урана (ppm)	Возраст (млн. лет) ($\pm 2\sigma$) (Pooled age)
1	Маган	M037-144.0	100	0.1398 (870)	1.13	0.66 \pm 0.03	215.1\pm18.4	2.0	201.0 \pm 19.4
2	Маган	M0931-391.8	32	0.0873 (214)	0.51		238.8\pm35.8	-	-
3	Контайская интрузия	G32-1095	19	0.1577 (192)	1.88		142.6\pm22.4	3.9-4.3	180.7 \pm 13.6, 173.1 \pm 13.0

Следует отметить, что полученные результаты пока имеют предварительный характер. Методика apatite fission-track LA-ICP-MS будет еще оптимизироваться в сторону расширения своей информативности. В частности, планируется реализовать одновременный анализ редкоземельных элементов.

Багдасарян Т.Э., Хубанов В.Б., Веселовский Р.В. Результаты LA-ICP-MS трекового датирования апатита из интрузивных тел Сибирской трапповой провинции // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов. Москва. 2022. С. 13.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований 2022 года установлено:

1. Ингурский массив щелочных гранитов А-типа сформировался в раннепермское время 272 млн лет назад (циркон, U-Pb, LA-ICP-MS). Это время характеризует завершающий этап позднепалеозойского гранитообразования на территории Забайкалья. Формирование гранитоидов проходило во внутриплитных условиях за счет плавления докембрийской континентальной коры и последующей дифференциации гранитной магмы с небольшой добавкой вещества мантийного происхождения. Редкометалльная минерализация щелочных гранитов Ингурского массива представлена в основном цирконом, бастнезитом, монацитом, ксенотимом.

2. Скаполит-содержащие габбро Бамбуйского массива (Витимская щелочная провинция, Северное Прибайкалье) образовались 270 млн лет назад за счет плавления субдукционно модифицированного источника в литосферной мантии, что обусловило повышенное содержание летучих компонентов в расплаве и кристаллизацию магматического скаполита-I, обогащенного SO_3 , Cl и CO_2 . Скаполит второго типа (скаполит-II), содержащий включения полевых шпатов и кальцита, образовался за счет контактового взаимодействия габброидов с вмещающими карбонатными породами.

3. Полученные данные свидетельствуют о синхронном проявлении мафического мантийного и существенно корового магматизма на завершающем этапе позднепалеозойской магматической активности в Забайкалье.

4. Установлены геологические и минералого-геохимические признаки, свойственные мафическим включениям в гранитоидах внутриплитного и надсубдукционного типов.

5. Получены предварительные результаты датирования апатита трековым методом.

В целом, планируемые на 2022 год исследования выполнены.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Занвилевич А.Н., Литвиновский Б.А., Андреев Г.Н. Монголо-Забайкальская щелочно-гранитоидная провинция. – М.: Наука, 1985. – 232 с.
- 2 Гордиенко И.В. Палеозойский магматизм и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса. – М.: Наука, 1987. – 240 с.
- 3 Гордиенко И.В. Эволюция палеозойского магматизма и эндогенного оруденения складчатого обрамления юга Сибирской платформы и геодинамические обстановки его формирования//Тихоокеанская геология. – 1992. – Т. 11. – № 4. – С. 101-109.
- 4 Гордиенко И.В. Роль островодужно-океанического, коллизионного и внутриплитного магматизма в формировании континентальной коры Монголо-Забайкальского региона: по структурно-геологическим, геохронологическим и Sm - Nd изотопным данным//Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – Т.12. – № 1. – С. 1-47. DOI: 10.5800/GT-2021-12-1-0510
- 5 Jahn B.M., Litvinovsky B.A., Zanzvilevich A.N., Reichow M. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian–Transbaikalian Belt: evolution, petrogenesis and tectonic significance//Lithos. – 2009. – Vol. 113 (3-4), P.521-539. DOI:10.1016/j.lithos.2009.06.015.
- 6 Reichow M.K., Litvinovsky B.A., Parrish R.R., Saunders A.D. Multi-stage emplacement of alkaline and peralkaline syenite–granite suites in the Mongolian–Transbaikalian belt, Russia: Evidence from U-Pb geochronology and whole rock geochemistry//Chemical Geology. – 2010. – Vol. 273 (1-2). P. 120-135. DOI:10.1016/j.chemgeo.2010.02.017.
- 7 Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Zanzvilevich A.N., Saunders A., Poulain S., Kuzmin D.V., Reichow M.K., Titov A.V. Petrogenesis of syenite–granite suites from the Bryansky Complex (Transbaikalia, Russia): implications for the origin of A-type granitoid magmas//Chemical Geology. – 2002. – Vol. 189 (1-2), P. 105-133. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)
- 8 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 Paleozoic post-collisional igneous province of Transbaikalia (Russia)//Lithos. – 2011. – Vol. 125, P. 845-874. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.04.007.
- 9 Tsygankov A., Khubanov V., Udoratina O., Coble M., Burmakina G. Western Transbaikalia: Petrogenetic and geodynamic implications from U-Pb isotopic–geochronological data//Lithos. – 2021. – Vol. 390-391, 106098. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106098.
- 10 Лыхин Д.А. Результаты Ar-Ar геохронологических исследований Ингурского массива, Забайкалье // Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы: Материалы VI Российской конференции по изотопной геохронологии/г. Санкт-Петербург, (2-5 июня 2015 г.). ИГГД РАН, 2015. – С. 169-171.
- 11 Булнаев К.Б., Карманов Н.С. Редкометальное оруденение в шпировых пегматитах Ингурского массива щелочных гранитов (Западное Забайкалье)//Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2005. – № 2. – С. 24-28.
- 12 Гордиенко И. В. Ресурсы стратегического минерального сырья Республики Бурятия: состояние и перспективы развития//Науки о Земле и недропользование. – 2020. – Т. 43. – № 1. – С. 8-35. DOI: 10.21285/2686-9993-2020-43-1-8-35
- 13 Галанин Е.Н., Васильченко В.В. Отчет о результатах работ Ингурской поисково-разведочной партии за 1961 г. (пос. Багда-рин). 1962. – 171 с.
- 14 Tsygankov A.A., Litvinovsky B.A., Jhan B.M., Reichow M.K., Liu D.Y., Larionov A.N., Presnykov S.L., Lepekhina Ye.N., Sergeev S.A. Sequence of magmatic events in the Late Paleozoic of Transbaikalia, Russia (U-Pb isotope data)//Russian Geology and Geophysics. – 2010. – Vol. 51 (9). P. 972-994. DOI: 10.1016/j.rgg.2010.08.007.
- 15 Ярмолук В.В., Коваленко В.И., Ковач В.П., Будников С.В., Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. Nd-изотопная систематика коровых магматических протолитов

- Западного Забайкалья и проблема рифейского корообразования в Центральной Азии//Геотектоника. – 1999. – № 4. – С. 3-20.
- 16 Литвиновский Б.А. Новые данные об условиях формирования святоноситов (на примере гранатовых сиенитов Бамбуйской интрузии, Витимское плоскогорье)//Геология и геофизика. – 1973. – №1. С. 42-51.
- 17 Newton R.C., Goldsmith J.R. Stability of the scapolite meionite ($3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot \text{CaCO}_3$) at high pressure and storage of CO_2 in the deep crust//Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1975. – Vol. 49. P. 49-62.
- 18 Goff F., Arney B.Y., Eddy A.C. Scapolite phenocrysts in a latite dome, Northwest Arizona, U.S.A//Earth Planet. Sci. Lett. – 1982. – Vol.60. P. 86-92.
- 19 Owen J.V., Greenough J.D. Scapolite Pegmatite from the Minas Fault, Nova Scotia: tangible Manifestation of Carboniferous, Evaporite-Derived Hydrothermal Fluids in the Western Cobequid Highlands//Mineralogical Magazine. – 1999. – Vol. 63. P. 387-397.
- 20 Lesne P., Scaillet B., Pichavant M., Beny J.M. The carbon dioxide solubility in alkali basalts: an experimental study//Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2011. – Vol. 162. P. 153-168.
- 21 Carter L.B., Dasgupta R. Hydrous basalt–limestone interaction at crustal conditions: Implications for generation of ultracalcic melts and outflux of CO_2 at volcanic arcs//Earth and Planetary Science Letters. – 2015. – Vol. 427. P. 202-214.
- 22 Visser D., Nijland T.G., Liefink D.J., Maijer C. The occurrence of preiswerkite in a tourmaline-biotite-scapolite rock from Blengsvatn, Norway//American Mineralogist. – 1999. – Vol. 84. P. 977-982.
- 23 Gajdošová M., Huraiová M., Hurai V., Slobodník M., Siegfried P.R. Two types of scapolite in Evate carbonatite deposit (Mozambique): implications for magmatic versus metamorphic origins//Acta geologica slovacica. – 2019. – Vol. 11(2). P. 63-74.
- 24 Thuc D.D., Trung H. Geology of Vietnam: Vol 2-Magmatic Formations. Vietnam Department of Geology and Minerals, Hanoi, (in Vietnamese with English abstract). 1995. P. 213-219.
- 25 Dumańska-Słowik M., Powoly T., Khac G., Heflik W., Sikorska-Jaworowska M. Petrogenesis of scapolite-rich gabbro from the alkaline Cho Don complex in north-eastern Vietnam - mineralogical and geochemical implications//Lithos. – 2020. – Vol. 374-375, 105703.
- 26 Tsygankov A.A., Khubanov V.B., Travin A.V., Lepekhina E.N., Burmakina G.N., Antsiferova T.N., Udoratina O.V. Late Paleozoic gabbroids of western Transbaikalia: U-Pb and Ar-Ar isotopic ages, composition, and petrogenesis//Russian Geology and Geophysics. – 2016. – Vol. 57. P. 790–808.
- 27 Burmakina G.N., Tsygankov A.A., Khubanov V.B. Petrogenesis of composite dikes in granitoids of western Transbaikalia//Russian Geology and Geophysics. – 2018. – Vol. 59. P. 19-40.
- 28 Ласточкин Е.И., Рипп Г.С., Орсов Д.А., Бадмацыренова Р.А. Оценка комагматичности габброидов и сиенитов Арсентьевского массива (Западное Забайкалье)//Литосфера. – 2018. – Т.18. – № 4. – С. 566-573.
- 29 Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С., Сергеев С.А. U-Pb (SHRIMP II) изотопное датирование цирконов из щелочных пород Витимской провинции, Западное Забайкалье//Доклады академии наук. – 2012. – Т. 443. – № 1. – С. 297-301.
- 30 Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С., Сергеев С.А., Конопелько Д.Л. U-Pb (SHRIMP II) геохронология Мухальского щелочного массива, Западное Забайкалье//Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 2. – С. 169-174.
- 31 Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С., Избродин И.А., Сергеев С.А., Травин А.В. Геохронология Гулхенского массива Витимской щелочной провинции, Западное Забайкалье//Доклады академии наук. – 2014. – Т. 457. – № 6. – С. 687-691.

- 32 Doroshkevich A.G., Izbrodin I.A., Rampilov M.O., Ripp G.S., Lastochkin E.I., Khubanov V.B. Permo-Triassic stage of alkaline magmatism in the Vitim plateau (western Transbaikalia)//*Russian Geology and Geophysics*. – 2018. – Vol. 59. P. 1061–1077.
- 33 Doroshkevich A.G.. Petrology of carbonatite and carbonate-containing alkaline complexes in Western Transbaikalia. PhD thesis, Ulan-Ude, 2013. 352 p. (in Russian).
- 34 Kotov A.B., Vladykin N.V, Yarmolyuk V.V, Sal'nikova E.B., Sotnikova I.A., Yakovleva S.Z. Permian age of the Burpala alkaline pluton, Northern Transbaikalia: Geodynamic implications//*Doklady Earth Sciences*. – 2013. – Vol. 453. P. 1082–1085.
- 35 Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Rampilov M.O., Elbaev A.L., Ripp G.S. Late Paleozoic alkaline magmatism in Western Transbaikalia, Russia: Implications for magma sources and tectonic settings//*Geoscience Frontiers*. – 2020. – Vol. 11. P. 1289-1303.
- 36 Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Rampilov M.O., Ripp G.S., Lastochkin E.I., Khubanov V.B., Posokhov V.F., Vladykin N.V. Age and mineralogical and geochemical parameters of rocks of the China alkaline massif (western Transbaikalia)//*Russian Geology and Geophysics*. – 2017. – Vol. 58. P. 903-921.
- 37 Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Khubanov V.B., Buyantuev M.D. Geodynamics of Late Paleozoic batholith-forming processes in western Transbaikalia//*Petrology*. – 2017. – Vol. 25. P. 396-418.
- 38 Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ivanov A.V., Ernst R., Mazukabzov A.M., Pisarevsky S.A., Ukhova N.A. Phanerozoic mafic magmatism in the southern Siberian craton: Geodynamic implications//*Russian Geology and Geophysics*. – 2010. – Vol. 51. P. 952-964.
- 39 Pearce J.A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (eds) *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva, Nantwich. – 1983. P. 230-249.
- 40 Kozlovsky A.M., Yarmolyuk V.V, Savatenkov V.M., Kovach V.P. Sources of basaltoid magmas in rift settings of an active continental margin: Example from the bimodal association of the Noen and Tost ranges of the Late Paleozoic Gobi-Tien Shan rift zone, southern Mongolia//*Petrology*. – 2006. – Vol. 14. P. 337-360.
- 41 Barbarin B. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts//*Lithos*. – 2005. – Vol. 80. P. 155 - 177.
- 42 Kemp A.I.S., Hawkesworth C.J. *Granitic Perspectives on the Generation and Secular Evolution of the Continental Crust. Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2003. – Vol.3. P. 349-410.
- 43 Cogné N., Chew D.M., Donelick R.A., Ansberque C. LA-ICP-MS apatite fission track dating: a practical zeta-based approach//*Chem. Geol.* – 2020. – Vol. 531. 119302

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования (Web of Science, Scopus, MathSciNet, Российский индекс научного цитирования, Google Scholar, European Reference Index for the Humanities и др.) по проекту за 2022 год:

Arzhannikova A.V., Demonterova E.I., Mikheeva E.A., Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Kamenetsky V.S., Jolivet M., **Khubanov V.B.** Segmental closure of the Mongol-Okhotsk ocean: insight from detrital geochronology in the East Transbaikalia basin//Geoscience Frontiers. – 2022. – Vol. 13 (1). 101254. **DOI: 10.1016/j.gsf.2021.101254.** (Q1)

Arzhannikova A.V., Demonterova E.I., Sizov A.V., Jolivet M., Mikheeva E.A., Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., **Khubanov V.B.** Early cretaceous topographic evolution associated with the collapse of the Mongol-Okhotsk orogen in Western Transbaikalia: an integrated analysis//International Geology Review. – 2022. **DOI: 10.1080/00206814.2022.2139296.** (Q1)

Dokukina K.A., Khiller V.V., **Khubanov V.B.**, Mints M.V., Dokukin P.A., Natapov L., Belousova E., Yakushik M.A. Neoproterozoic high-pressure granulite-facies anatexis of continental rocks in the Belomorian Eclogite Province, Russia//Precambrian Research. – 2022. – Vol. 381. 106843. **DOI: 10.1016/j.precamres.2022.106843.** (Q1)

Gladkochub D.P., Motova Z.L., Donskaya T.V., Sizov A.V., **Khubanov V.B.** Cambrian/Ordovician boundary as a milestone in the sedimentation history of the southern Siberian craton: evidence from U-Pb dating of detrital zircons//Journal of Asian Earth Sciences: X. – 2022. – Vol. 8. 100107. **DOI: 10.1016/j.jaesx.2022.100107.** (Q1)

Izbrodin I.A., **Doroshkevich A.G.**, **Rampilov M.O.**, **Lastochkin E.I.**, Savatenkov V., **Posokhov V.**, **Khubanov V.**, Redina A.A. Age and petrogenesis of scapolite gabbro from the Bambuy intrusion (Vitim plateau, Russia) and their tectonic significance//International Journal of Earth Sciences. – 2022. – Vol. 111 (6). P. 1859 - 1883. **DOI: 10.1007/s00531-022-02202-4** (Q1)

Rampilova M.V., **Rampilov M.O.**, **Izbrodin I.A.** Compositional Features and Age of Alkaline Granites of the Ingur Massif, Western Trans-Baikal Area//Geodynamics & Tectonophysics. – 2022. – Vol. 13 (4). **DOI: 10.5800/GT-2022-13-4-0647** (Q2)

Zhmodik S.M., Buslov M.M., Damdinov B.B., Mironov A.G., **Khubanov V.B.**, **Buyantuyev M.G.**, Damdinova L.B., Airiyants E.V.; Kiseleva O.N., Belyanin D.K. Mineralogy, Geochemistry, and Geochronology of the Yehe-Shigna Ophiolitic Massif, Tuva-Mongolian Microcontinent, Southern Siberia: Evidence for a Back-Arc Origin and Geodynamic Implications//Minerals. – 2022. – Vol. 12(4). 390. **DOI: 10.3390/min12040390.** (Q2)

Дампилова Б.В., **Дорошкевич С.Г.** Подвижные формы элементов в техноземах хвостохранилища Нерчинского полиметаллического комбината//Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022. – № 2. – С. 62 - 67. **DOI: 10.20403/2078-0575-2022-2-62-67.** (Q3)

Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Склярков Е.В., **Хубанов В.Б.**, Демонтерова Е.И., Мотова З.Л. Метатерригенные породы Ольхонского террейна Центрально-Азиатского складчатого пояса: U-Pb возраст цирконов, геохимическая характеристика и модели формирования осадочных протолитов//Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. – №3. **DOI: 10.5800/GT-2022-13-3-0635.** (Q2)

Канакин С. В., **Хубанов В. Б.**, **Жалсараев Б. Ж.**, **Посохов В. Ф.**, **Дампилова Б. В.**, **Хромова Е. А.**, **Хубанова А. М.**, **Лыгденова Б. Б.** Центр коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института СО РАН//Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. – № 2. **DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0583.** (Q2)

Нугуманова Я.Н., **Дорошкевич А.Г.** Состав шпинелидов из позднепротерозойских ультраосновных лампрофиров Большетагнинского щелочно-ультраосновного

карбонатитового массива (Урикско-Ийский грабен, Восточное Присяянье)//Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. – № 4. **DOI:** 10.5800/GT-2022-13-4-0656 (Q2)

Сычев С.Н., Худoley А.К., Лебедева О.Ю., Соколов С.Д., Рогов А.В., **Хубанов В.Б.**, Ларионов А.Н., Львов П.А. Тектоническая эволюция и источники сноса нижнепалеозойских терригенных пород Омудевского и Рассохинского террейнов (Северо-Восток России)//Геотектоника. – 2022. – № 5. – С. 3 - 26. **DOI:** 10.31857/S0016853X2205006X (Q3)

Уляшева Н.С., **Хубанов В.Б.** U–Pb LA–SF–ICP–MS-возраст зерен циркона из метаплагиогранита Харбейского метаморфического комплекса (Полярный Урал)//Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – Т. 504. – № 1. – С. 52 - 59. **DOI:** 10.31857/S2686739722050188 (Q3)

Не рецензируемые издания

Багдасарян Т.Э., **Хубанов В.Б.**, Веселовский Р.В. Результаты LA–ICP–MS трекового датирования апатита из интрузивных тел Сибирской трапповой провинции // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов. Москва. 2022. С. 13.

Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А. Гранитоидный магматизм и мантийно-коровое взаимодействие // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). М-лы научной конф. Иркутск. ИЗК СО РАН. 2022. С. 36-38.

Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А. Мафические включения в гранитоидах разных геодинамических обстановок // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022. М-лы ЛП Тектонического совещания. Т.1. М.: ГЕОС. 2022. С. 76-79.

Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А., Хубанов В.Б. Гранитоидный магматизм и мантийно-коровое взаимодействие // Петрология и рудоносность магматических формаций: м-лы научной конф. Новосибирск. ИПЦ НГУ. 2022. С.23-25.

Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А., Хубанов В.Б. Особенности смешения магм в гранитоидах разных геодинамических обстановок // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. М-лы XII Всероссийской научно-практической конф. Якутск. Изд. дом СВФУ. 2022. С. 19-23.

Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Мотова З.Л., **Хубанов В.Б.**, Сизов А.В. Граница кембрия-ордовика - начало главного орогенеза фанерозоя на юге сибирской платформы: по результатам U–Pb LA–ICP–MS датирования детритовых цирконов // Добрецовские чтения: наука из первых рук. Материалы Первой Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающего ученого и организатора науки академика РАН Николая Леонтьевича Добрецова. 1-5 августа 2022 г. Новосибирск. 2022. С. 67-69.

Ефремов С.В., Дамдинов Б.Б., **Хубанов В.Б.** Породы ТТГ ассоциации фундамента Тувино-Монгольского микроконтинента. U–Pb изотопный возраст, первичные составы, геохимические эффекты при ультраметаморфизме // Современные направления развития геохимии. М-лы Всерос. Конф. 2022. Иркутск. Изд-во Ин-та географии им. В.Б Сочавы СО РАН. Т.2. С. 182-185.

Кузьмичев А.Б., Данукалова М.К., Бабицкий Е.Ф., Сомсикова А.В., **Хубанов В.Б.**, Брянский Н.В., Дубенский А.С. поиски террейна, столкнувшегося с Енисейской окраиной Сибирского палеоконтинента в конце неопротерозоя. 1. Состав, возраст и геодинамическая позиция «островодужного» порожнинского гранитного комплекса на северо-западной окраине Енисейского кряжа // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). М-лы научной конф. Иркутск. ИЗК СО РАН. 2022. С. 158-160.

Мотова З.Л., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., **Хубанов В.Б.** Поздневендский-раннекембрийский этап в истории южной окраины Сибирской платформы: результаты изучения возраста детритовых цирконов и составов терригенных пород присаянского регионального горизонта // Добрецовские чтения: наука из первых рук. Материалы Первой Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающего ученого и организатора науки академика РАН Николая Леонтьевича Добрецова. 1-5 августа 2022 г. Новосибирск. 2022. С. 222–225.

Смирнов Ю.В., **Хубанов В.Б.** Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) геохронологических исследований позднекаменноугольных риолитов приамурского фрагмента Нора-Сухотинского террейна // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). М-лы научной конф. Иркутск. ИЗК СО РАН. 2022. С. 276-277.

Травин А.В., Буслов М.М., Бишаев Ю.А., **Цыганков А.А.** Мультитермохронология Ангаро-Витимского гранитоидного батолита как летопись эволюции Монголо-Охотского орогена // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). М-лы научной конф. Иркутск. ИЗК СО РАН. 2022. С. 296-298.

Хубанов В.Б., Долгобородова К.Д., Цыганков А.А., Хубанова А.М., Бурмакина Г.Н. Возраст и состав базитов Восточно-Саянской редкометальной зоны Баргузинской провинции // Петрология и рудоносность магматических формаций: материалы науч. конф. Новосибирск. ИПЦ НГУ. 2022. С. 215–216.

Цыганков А.А. Петрология конвергентных и постколлизийных ультрамафит-мафитовых и гранитоидных серий // Современные проблемы наук о Земле. Тез. Всероссийской научной конф. М.: РАН. 2022. С. 138-139.

Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н. Петрология и геодинамика ультрамафит-мафитовых и гранитоидных серий байкальского сегмента ЦАСП // Современные направления развития геохимии. М-лы Всерос. Конф. 2022. Иркутск. Изд-во Ин-та географии им. В.Б Сочавы СО РАН. Т.2. С. 203-206.

Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б. Геодинамика батолитообразования в Центральной и Северо-Восточной Азии // Добрецовские чтения: наука из первых рук. Материалы Первой Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающего ученого и организатора науки академика РАН Николая Леонтьевича Добрецова. 1-5 августа 2022 г. Новосибирск. 2022. С. 349–351.

Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б. Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. М-лы XII Всероссийской научно-практической конф. Якутск. Изд. дом СВФУ. 2022. С. 140-145.

Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б. Гранитоиды южной части Главного батолитового пояса (Северо-Восток Азии): новые U-Pb и Sm-Nd изотопные данные, петрогенетические и геодинамические следствия // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022. М-лы LI Тектонического совещания. Т.2. М.: ГЕОС. 2022. С. 276-279.

Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б. Смещение магм в гранитоидах Восточной Тувы (новые данные) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). М-лы научной конф. Иркутск. ИЗК СО РАН. 2022. С. 313-314.

Цыганков А.А., Хубанов В.Б., Бурмакина Г.Н. Источники магм и геодинамические условия формирования разновозрастных А-гранитов Забайкалья // Петрология и рудоносность магматических формаций: м-лы научной конф. Новосибирск. ИПЦ НГУ. 2022. С.217-219.