



AGE OF GRANITOIDS OF THE BEKCHIUL PLUTON (LOWER AMUR REGION)

I.A. Alexandrov ✉, V.V. Ivin , S.Yu. Budnitskiy, E.Yu. Moskalenko

Far East Geological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 159 100-letya Ave, Vladivostok 690022, Russia

ABSTRACT. The Bekchiul pluton is located in the Lower Amur region and is a large granitoid body of complex structure within the Zhuravlevka-Amur terrain of the Sikhote-Alin orogenic belt. On the northwestern flank of the Bekchiul pluton there is the Mnogovershinnoe gold-silver deposit. To determine the formation time of this pluton, U/Pb dating was performed on zircons from the second-phase granodiorite of the Bekchiul complex and the third-phase granite. Granodiorite yielded U-Pb age of 73.8 ± 0.4 Ma, and granite – 66.2 ± 0.3 Ma. Some zircon grains found in granite have a U-Pb age of 75.6 ± 0.6 Ma which is close to that of granodiorites. Magmatic pulses of about 76–73 Ma and about 66 Ma are synchronous with the stages of ore formation of the Mnogovershinnoe deposit, corresponding to earlier-obtained K-Ar age of adularia from ore zones. The formation of granitoids and the associated mineralization probably occurred due to subduction of the Izanagi Plate beneath the continental margin.

KEYWORDS: Bekchiul pluton; Sikhote-Alin orogenic belt; Zhuravlevka-Amur terrain; granitoids; U-Pb zircon dating; Late Cretaceous

FUNDING: The work has been done under support of the Russian Science Foundation as part of research project 22-17-00198.



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Igor A. Alexandrov, alexandrov@fegi.ru

Received: September 10, 2022

Revised: October 5, 2022

Accepted: October 13, 2022

FOR CITATION: Alexandrov I.A., Ivin V.V., Budnitskiy S.Yu., Moskalenko E.Yu., 2023. Age of Granitoids of the Bekchiul Pluton (Lower Amur Region). *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (2), 0694. doi:10.5800/GT-2023-14-2-0694

ВОЗРАСТ ГРАНИТОИДОВ БЕКЧИУЛСКОГО ИНТРУЗИВНОГО МАССИВА (НИЖНЕЕ ПРИАМУРЬЕ)**И.А. Александров, В.В. Ивин, С.Ю. Будницкий, Е.Ю. Москаленко**

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, Россия

АННОТАЦИЯ. Бекчиулский интрузивный массив расположен в Нижнем Приамурье и представляет собой крупный гранитоидный плутон сложного строения в пределах Журавлевско-Амурского террейна Сихотэ-Алинского орогенного пояса. На северо-западном фланге Бекчиулского плутона находится крупное золотосеребряное месторождение Многовершинное. Для определения времени формирования данного плутона было проведено U-Pb датирование цирконов из гранодиорита второй фазы бекчиулского комплекса и гранита третьей фазы. Для гранодиорита был получен возраст 73.8 ± 0.4 млн лет, а для гранита – 66.2 ± 0.3 млн лет. При этом в последнем обнаружены немногочисленные зерна циркона, близкие по возрасту гранодиоритам – 75.6 ± 0.6 млн лет. Магматическим импульсам около 76–73 млн лет и около 66 млн лет синхронны стадии рудообразования Многовершинного месторождения, соответствующие возрасту адуляра из рудных зон, полученного ранее K-Ar методом. Формирование гранитоидов и связанное с ними рудообразование, вероятно, происходили в результате субдукции плиты Иизанаги под окраину континента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Бекчиулский массив; Сихотэ-Алинский орогенный пояс; Журавлевско-Амурский террейн; гранитоиды; U-Pb датирование цирконов; поздний мел

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта 22-17-00198.

1. ВВЕДЕНИЕ

Бекчиулский интрузивный массив расположен в Нижнем Приамурье (Николаевский район Хабаровского края) и представляет собой крупный (~600 км²) гранитоидный плутон сложного строения (рис. 1). Согласно тектонической схеме региона [Khanchuk et al., 2016] он размещается в самой северо-восточной части Журавлевско-Амурского террейна раннемелового окраинно-континентального турбидитового бассейна (Сихотэ-Алинский орогенный пояс). Гранитоиды прорывают среднепозднеюрские терригенные породы (с прослоями и линзами кремнисто-глинистых пород, спилитов и долеритов) основания Журавлевско-Амурского террейна и согласно залегающие на них раннемеловые отложения.

На северо-западном фланге Бекчиулского плутона находится крупное золотосеребряное месторождение Многовершинное, поэтому изучению магматических пород рассматриваемого района уделялось большое внимание, главным образом в 70–80-е годы прошлого века. Еще на ранних стадиях исследований отмечалась многоэтапность и длительность формирования плутона, некоторыми авторами датируемая периодом от позднего мела до позднего эоцена [Zalishchak et al., 1978]. Также выделялось несколько стадий рудообразования Многовершинного месторождения и отмечалось повышенное содержание золота в гранитоидах, особенно в гранодиоритах и граносиенитах [Zalishchak et al., 1978], относимых сейчас ко второй фазе бекчиулского комплекса (рис. 1, 6). Кроме того, в упомянутых гранодиоритах обнаружены зерна золота комковатой формы [Zalishchak, Piskunov 1983]. В работе [Khomich

et al., 2018] были приведены результаты K-Ar датирования адуляра из рудных зон месторождения диапазоном от 75.4 до 66.4 млн лет (пять датировок) и распространенных здесь гранитоидов (восемь датировок по валу) – 77.1–57.3 млн лет. Следует учитывать, что полученный по валовому составу K-Ar возраст гранитоидов может быть отражением широко проявленных вторичных процессов.

На Государственной геологической карте масштаба 1:1000000 третьего поколения [State Geological Map..., 2016] гранитоиды Бекчиулского массива отнесены ко второй фазе позднемелового нижнеамурского комплекса и трем фазам палеоценового бекчиулского комплекса (рис. 1, 6). Дайки гранитоидов третьей фазы комплекса секут рудные тела Многовершинного месторождения. Гранитоиды нижнеамурского и бекчиулского комплексов имеют близкий состав, а разные фазы данных комплексов по вещественному составу отличаются степенью дифференцированности (от диоритов первой фазы до гранитов-лейкогранитов третьей) [State Geological Map..., 2016]. Таким образом, отнесение пород к конкретной фазе или комплексу достаточно условно, а их реальная распространенность достоверно неизвестна.

Авторами были изучены гранитоиды, условно отнесенные ко второй и третьей фазе бекчиулского комплекса. Породы второй фазы представлены гранодиоритами и гранодиорит-порфирами с амфиболом, биотитом и иногда – клинопироксеном. К гранитоидам третьей фазы относятся гранит-порфиры и граниты. Из темноцветных минералов они содержат биотит и амфибол. Образец X17-24-16, условно отнесенный

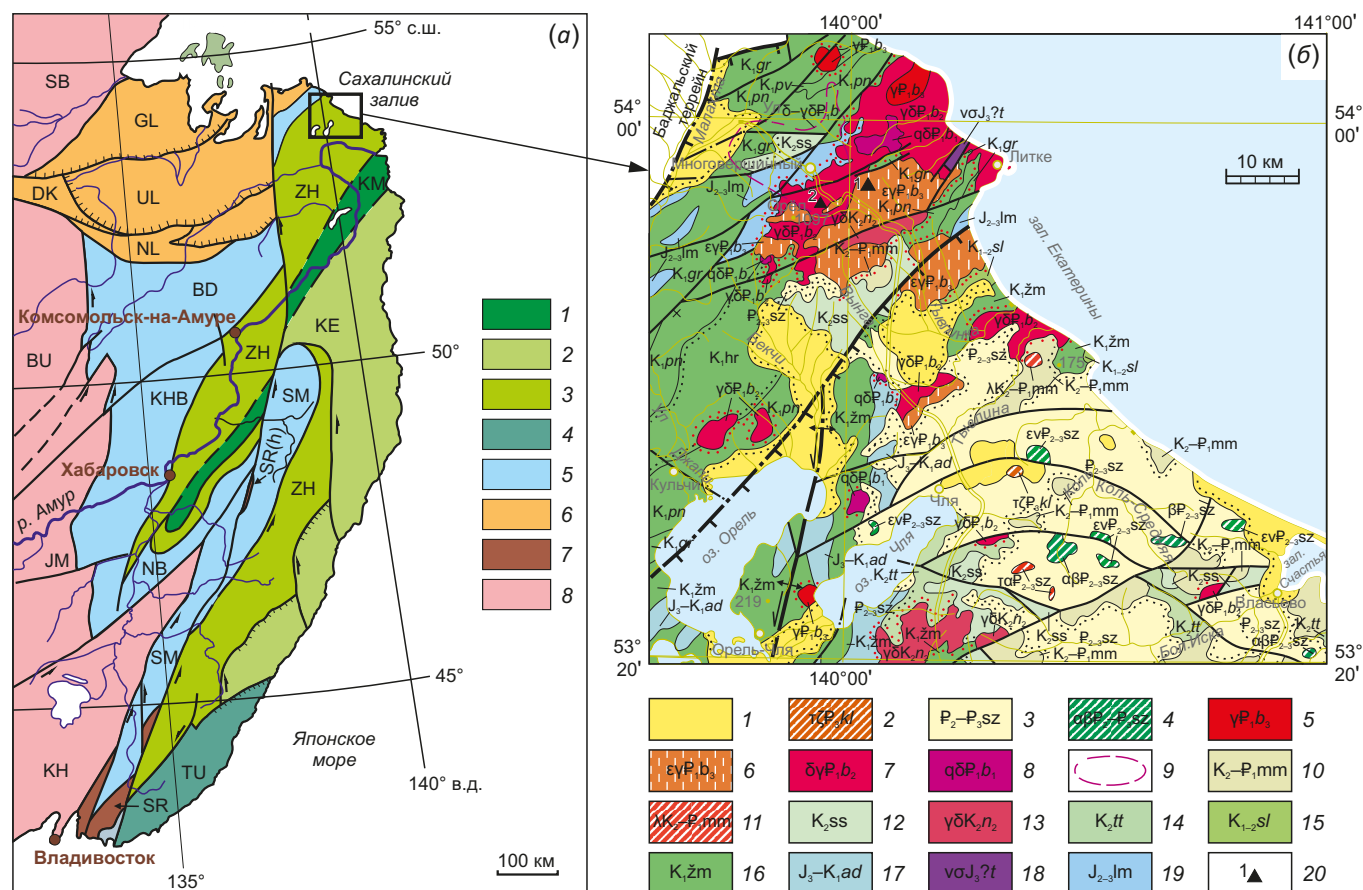


Рис. 1. Геологическая позиция Бекчиулского интрузивного массива.

(а) – тектоническая схема Сихотэ-Алиня и прилегающих территорий [Khanchuk et al., 2016]. 1 – Киселевско-Маноминский террейн (KM) готеривско-раннеальбской аккреционной призмы; 2 – Кемский террейн (KE) готеривско-раннеальбской островной дуги; 3 – Журавлевско-Амурский террейн (ZH) раннемелового турбидитового бассейна; 4 – Таухинский террейн (TU) неокомской аккреционной призмы; 5 – юрские аккреционные террейны (SM – Самаркинский, NB – Наданьхада-Бикинский, BD – Баджалский, KHB – Хабаровский); 6 – террейны Монголо-Охотского орогенного пояса (DK – Джагды-Кербинский, NL – Ниланский, UL – Ульбанский); 7 – террейны палеозойской континентальной окраины, залегающие на юрской аккреционной призме (SR – Сергеевский, SR(h) – Хорский); 8 – раннепалеозойский супертеррейн Буря (BU) – Джамуси (JM) – Ханка (KH) и Сибирский кратон (SB).

(б) – фрагмент геологической карты северно-восточной части Журавлевско-Амурского террейна ([State Geological Map..., 2016], с изменениями). 1 – неоген-четвертичные отложения; 2 – субвулканические образования колчанского трахириолит-трахидацитового вулканического комплекса; 3–4 – сизиманский базальтовый вулканический комплекс: 3 – сизиманская толща; 4 – субвулканические образования ($\alpha\beta$ – андезибазальты, $\epsilon\gamma$ – умеренно щелочные долериты); 5–9 – бекчиулский диорит-гранитовый plutonический комплекс: 5 – третья фаза (граниты), 6 – третья фаза (умеренно щелочные граниты), 7 – вторая фаза (гранодиориты, граносиениты), 8 – первая фаза (кварцевые диориты), 9 – поле развития малых тел и даек диорит-гранодиоритового состава; 10–11 – маломихайловский дацит-риолитовый вулканический комплекс: 10 – маломихайловская свита, 11 – субвулканические образования (риолиты); 12 – сусанинская толща сусанинского андезитового вулканического комплекса; 13 – вторая фаза нижнеамурского диорит-гранодиоритового plutonического комплекса (гранодиориты, тоналиты, плагиограниты, кварцевые диориты, гранит-порфиры); 14 – татаркинская свита татаркинского дацит-риолитового вулканического комплекса; 15 – туфотерригенные отложения силасинской свиты; 16 – туфотерригенные отложения раннего мела (K_2m – жорминская толща, K_1hr – херпучинская толща, K_1pv – пиванская свита; K_1pn – пионерская свита, K_1gr – горинская свита); 17 – адаминская свита; 18 – тавервейские перидотиты серпентизированные; 19 – лимурчанская толща; 20 – места отбора датированных образцов (1 – обр. X17-24-1a, 2 – обр. X17-27).

Fig. 1. Geological position of the Bekchiul granitoid pluton.

(a) – tectonic scheme of the Sikhote-Alin and adjacent areas [Khanchuk et al., 2016]. 1 – Kiselevsk-Manomin terrain (KM) of the Hauterivian – Early Albian accretionary prism; 2 – Kemsy terrain (KE) of the Hauterivian – Early Albian island arch; 3 – Zhuravlevka-Amur terrain (ZH) of the Early Cretaceous turbidite basin; 4 – Taukha terrain (TU) of the Neocomian accretionary prism; 5 – Jurassic accretionary terrains (SM – Samarka, NB – Nadankhada-Bikin, BD – Badzhal, KHB – Khabarovsk); 6 – terrains of the Mongol-Okhotsk orogenic belt (DK – Dzhaigdy-Kerbin, NL – Nilan, UL – Ulban); 7 – Paleozoic continental marginal terrains overlying the Jurassic accretionary prism (SR – Sergeevsky, SR(h) – Khor); 8 – Early Paleozoic Bureya (BU) – Jamusi (JM) – Khanka (KH) superterrain and Siberian craton (SB).

(6) – a fragment of the geological map of the northeastern Zhuravlevka-Amur terrain (modified after [State Geological Map..., 2016]). 1 – Neogene-Quaternary deposits; 2 – subvolcanic formations of the Kolchan trahyrhvolite-trahydacite volcanic complex; 3–4 – Siziman

basaltic volcanic complex: 3 – Siziman unit, 4 – subvolcanic formations ($\alpha\beta$ – andesibasalts, $\epsilon\gamma$ – moderately alkaline dolerites); 5–9 – Bekchiul diorite-granite plutonic complex: 5 – third phase (granites), 6 – third phase (moderately alkaline granites), 7 – second phase (granodiorites, granosyenites), 8 – first phase (quartz diorites), 9 – a field of development of dioritic and granodioritic small bodies and dikes; 10–11 – Malomikhailovsky dacite-rhyolite volcanic complex: 10 – Malomikhailovsky formation, 11 – subvolcanic formations (rhyolites); 12 – Susaninsky unit of the Susaninsky andesite volcanic complex; 13 – second phase of the Lower Amur diorite-granodiorite plutonic complex (granodiorites, tonalities, plagiogranites, quartz diorites, granite porphyries); 14 – Tatarka formation of the Tatarka dacite-rhyolite volcanic complex; 15 – tuffaceous-terrigeneous deposits of the Silasinsky Formation; 16 – tuffaceous-terrigeneous deposits of the Early Cretaceous ($K_1\text{zm}$ – Zhormin unit, $K_1\text{hr}$ – Kherpuchinsky unit, $K_1\text{pv}$ – Pivansky formation; $K_1\text{pn}$ – Pioneer formation, $K_1\text{gr}$ – Gorin Formation); 17 – Adaminsky formation; 18 – Tavervei serpentinized peridotites; 19 – Limurchansky unit; 20 – sites where the dated samples were taken (1 – sample X17-24-1a, 2 – sample X17-27).

авторами к третьей фазе, представляет собой кварцевый диорит и был отобран в поле распространения пород данной фазы на одной точке с описанным ниже амфибол-биотитовым гранитом (X17-24-1a). Так же как гранит, из темноцветных минералов он содержит амфибол и биотит. В связи с дефицитом коренных обнажений образцы были отобраны главным образом из свалов (курумов) на вершинах и гребнях гор. Таким образом, отсутствует возможность судить о взаимоотношении отличающихся разностей изученных гранитоидов.

2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ

Было выполнено U-Pb датирование цирконов из двух образцов гранитоидов Бекчиулского массива.

Образец X17-24-1a – амфибол-биотитовый гранит третьей фазы бекчиулского комплекса, массивная среднекрупнозернистая порфириовидная порода с гранитной структурой. Порфириовидные выделения представлены щелочным полевым шпатом (30–40 %) и плагиоклазом олигоклаз-альбитового состава (20 %), между зернами которых находится ксеноморфный кварц (25–30 %). Мафические минералы представлены зеленовато-коричневым биотитом (10–15 %) и единичными зернами роговой обманки. Аксессуары – титанит, рудный минерал и циркон.

Образец X17-27 – биотит-амфиболовый гранодиорит второй фазы бекчиулского комплекса. Массивная среднекрупнозернистая порфириовидная порода с гипидиоморфно-зернистой структурой. Порфириовидные выделения представлены табличками плагиоклаза андезин-олигоклазового состава (40 %) и меньшими по размеру зернами щелочного полевого шпата (25 %), между которыми и находится ксеноморфный кварц (15 %). Темноцветные минералы представлены зеленой роговой обманкой (15 %) и зеленовато-коричневым биотитом (5–10 %), как образующим самостоятельные лейсты, так и замещающим амфибол. Аксессуары – титанит, рудный минерал, апатит, циркон.

Для изучения морфологии и зональности зерен циркона использовались катодолюминесцентные изображения, полученные с помощью приставки Gatan MiniCL, установленной на электронно-зондовый микроанализатор JEOL JXA-8100.

Анализ изотопного состава U-Pb-Th в цирконе выполнен по стандартной методике [Jackson et al., 2004] на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно

связанной плазмой Agilent 7500a, оснащенном системой лазерной абляции UP-213 (New Wave Research). Диаметр абляционного кратера составлял 40 мкм. Исследуемый материал из ячейки образца извлекался с помощью гелия, а в горелку масс-спектрометра транспортировался потоком смеси газов гелия и аргона. Для расчета датировок использовались зерна цирконов TEMORA. С целью контроля воспроизводимости получаемых результатов и стабильности работы прибора проводился анализ цирконов GJ-1 и 91500. Расчет изотопных соотношений проводился с помощью программы Glitter версии 4.4.2 (Access Macquarie Ltd), а дальнейшая обработка – с использованием приложения IsoplotR [Vermeesch, 2018].

Также был выполнен элементный анализ пяти образцов гранитоидов. Определение содержания петрогенных элементов (кроме SiO_2) проводилось на атомно-эмиссионном спектрометре (iCAP 7600 Duo) с индуктивно связанной плазмой, а содержания микроэлементов – методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS Agilent 7500c). Для разложения образцов использовалась процедура сплавления с метабора́том лития. Точность измерения концентраций микроэлементов подтверждена анализом международных и российского стандартных образцов горных пород JG-3, JR-1 (Геологическая служба Японии) и СГ-3 (ГСО №3333-85, Россия). Значение относительного стандартного отклонения при определении редких и редкоземельных элементов составляет 5–15 %.

Концентрации H_2O^- , потери при прокаливании (ППП) и SiO_2 определялись методом гравиметрии, основанном на точном измерении массы малорастворимого соединения, содержащего определяемый элемент. При этом определение гигроскопической воды (H_2O^-) проводилось путем измерения потери массы образца в процессе высушивания его при температуре 105 °C до постоянной массы. При определении PPP навеску породы прокаливали при 1000 °C, что приводит к убыли в весе за счет суммарной воды, двуокиси углерода и органических веществ. Содержание кремнезема в породах измерялось в результате взвешивания навески после ее разложения сплавлением с безводным карбонатом натрия, обработки фтористоводородной кислотой и отгонки летучих соединений кремния.

Все аналитические работы выполнялись в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

По геохимическим характеристикам изученные породы относятся к магнезиальным щелочно-известковым гранитоидам I-типа (Прил. 1, табл. 1.1; рис. 2, а–в). Породы условной третьей фазы отличаются более высокой глиноземистостью, а образец X17-24-1а даже попадает в поле гранитоидов S-типа (рис. 2, в), хотя индикаторных высокоглиноземистых минералов он не содержит. По содержанию калия гранитоиды второй фазы попадают в поле пород шошонитовой серии, а третьей фазы – высококалиевой известково-щелочной серии (рис. 2, г). Значение суммы щелочей от 7.7 вес. % в кварцевом диорите до 8.4 вес. % в наиболее щелочном граните (X17-24-1) с существенным преобладанием калия над натрием в породах – K_2O/Na_2O от 1.6 до 2.5.

Изученные породы характеризуются сходными спектрами распределения редкоземельных элементов (рис. 2, д). Европиевая аномалия у одного из гранодиоритов второй фазы практически отсутствует и слабо выражена у кварцевого диорита. У трех остальных

образцов Eu/Eu^* составляет 0.42–0.59. В целом P3Э умеренно фракционированны – $(La/Yb)_N$ от 8.4 до 14.0, а их сумма – 96–175 ppm. На нормированных к NMORB мультиэлементных диаграммах (не приведены) присутствуют отрицательные аномалии Ta, Nb и Ti.

Зерна циркона из гранита X17-21-1а идиоморфные, с тонкой осцилляторной зональностью (рис. 3, а). Размер зерен 150–300 мкм. Величина соотношения Th/U от 0.66 до 1.51 (Прил. 1, табл. 1.2). Таким образом, изученные зерна представляют собой типичные кристаллизовавшиеся из расплава цирконы. По результатам U-Pb датирования (Прил. 1, табл. 1.2) выделены две популяции цирконов. Для более древней получен возраст 75.6 ± 0.6 млн лет (рис. 3, б), а для более молодой и более многочисленной (77 % зерен) – 66.2 ± 0.3 млн лет (рис. 3, в).

Характер циркона из гранодиорита X17-27 не столь однозначен (рис. 3, а). Зерна часто имеют округлую форму, а осцилляторная зональность в них отсутствует. Идиоморфные с осцилляторной зональностью зерна присутствуют в меньшем количестве. Размер

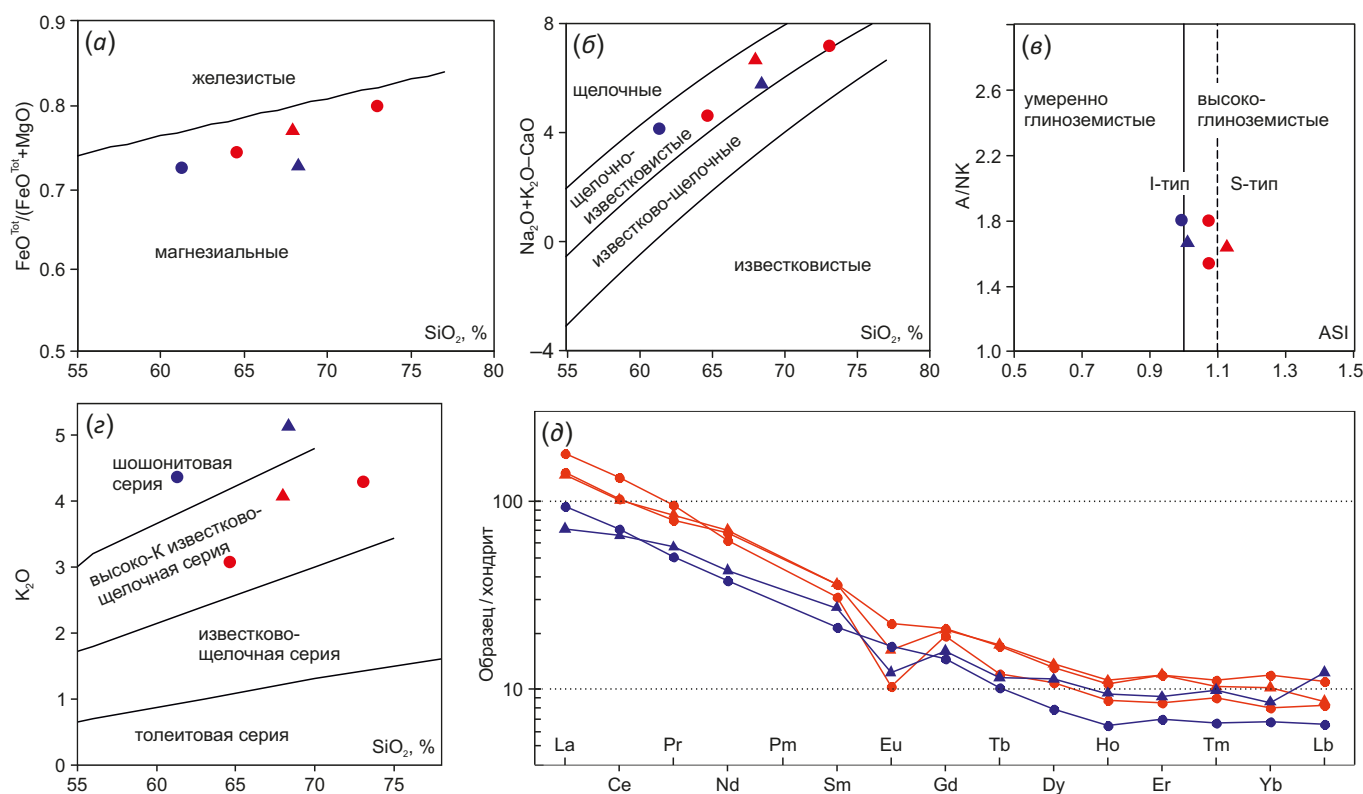


Рис. 2. Геохимические характеристики изученных пород на диаграммах.

(а) – SiO_2 – $FeO_{общ.}/(FeO_{общ.}+MgO)$ [Frost et al., 2001]; (б) – SiO_2 – Na_2O+K_2O+CaO [Frost et al., 2001]; (в) – ASI – A/NK, где $ASI=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO-1.67P_2O_5)$, $A/NK=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ в мольных количествах [Frost et al., 2001]; (г) – SiO_2 – K_2O [Peccherillo, Taylor, 1976]; (д) – хондрит-нормализованное распределение редкоземельных элементов (значения для хондрита по [Anders, Grevesse, 1989]). Синие значки – гранитоиды второй фазы бекчиулского комплекса, красные – третьей фазы. Треугольники – датированные образцы.

Fig. 2. Geochemical characteristics of the studied rocks plotted in moles.

(а) – SiO_2 – $FeO_{общ.}/(FeO_{общ.}+MgO)$ [Frost et al., 2001]; (б) – SiO_2 – Na_2O+K_2O+CaO [Frost et al., 2001]; (в) – ASI – A/NK, где $ASI=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO-1.67P_2O_5)$, $A/NK=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ [Frost et al., 2001]; (г) – SiO_2 – K_2O [Peccherillo, Taylor, 1976]; (д) – chondrite-normalized distribution of rare-earth elements (chondrite values are based on [Anders, Grevesse, 1989]). Blue marks are second-phase granitoids of the Bekchiul complex, red marks – third-phase granitoids. Triangles are dated samples.

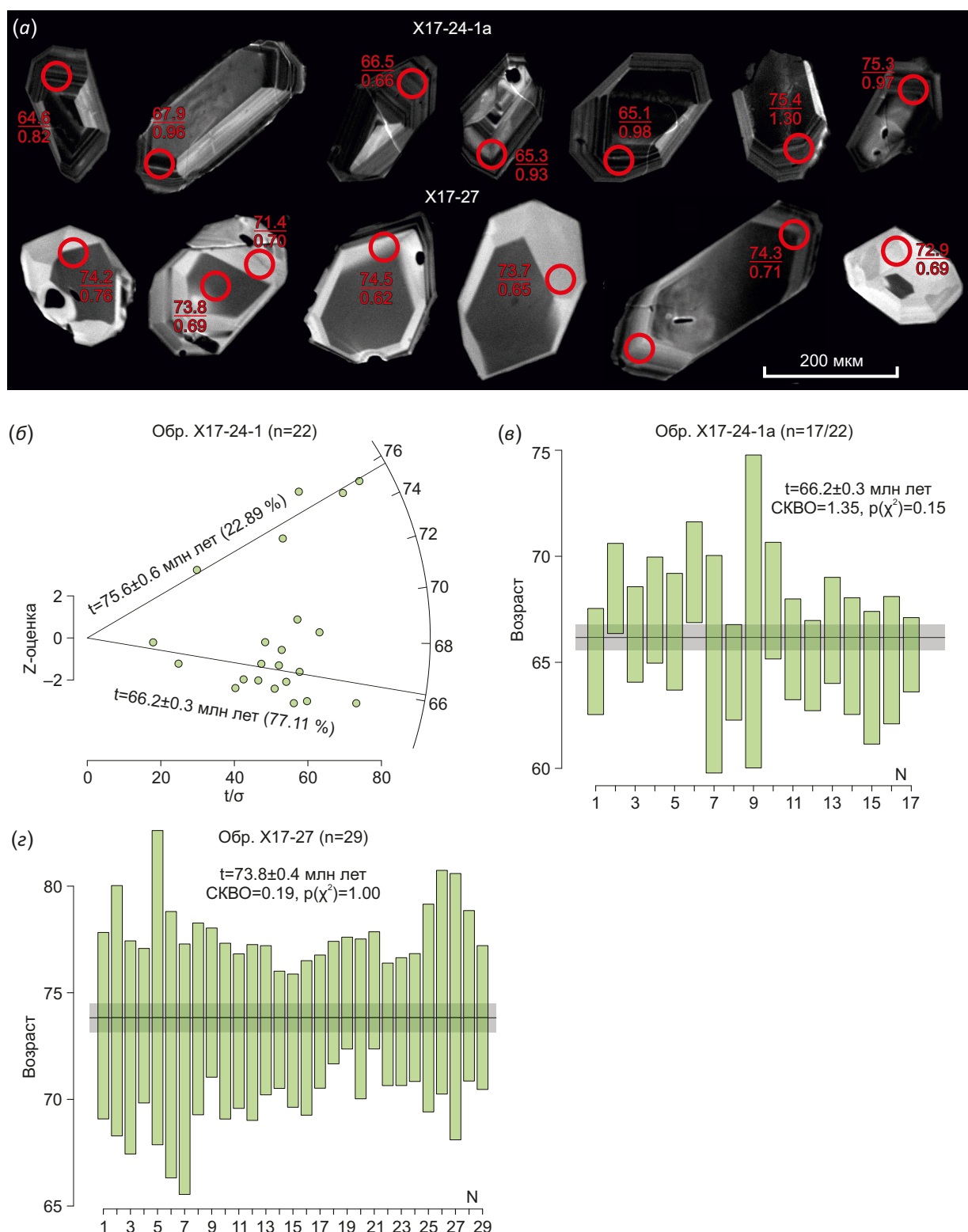


Рис. 3. Результаты исследования цирконов.

(a) – катодолуминесцентные изображения представителных зерен циркона из исследованных гранитоидов с отмеченными точками анализа. Рядом с точками в числителе указан U-Pb возраст (млн лет), в знаменателе – величина соотношения Th/U; (б) – радиальная диаграмма оценки возраста обр. X17-24-1a; (в) – диаграмма средневзвешенной оценки возраста молодой популяции циркона обр. X17-24-1a; (г) – диаграмма средневзвешенной оценки возраста обр. X17-27.

Fig. 3. The results of study of zircons.

(a) – cathodoluminescent images of representative zircon grains from the studied granitoids with the marked points of analysis. The numerator near the points shows U-Pb age (Ma), the denominator shows Th/U ratio value; (б) – a radial diagram of age estimation for sample X17-24-1a; (в) – a diagram of weighed average estimation of age for young population of zircon in sample X17-24-1a; (г) – a diagram of weighed average estimation of age for sample X17-27.

зерен 150–370 мкм. Значения Th/U от 0.56 до 0.99 (Прил. 1, табл. 1.2). Средневзвешенный U-Pb возраст изученных цирконов составил 73.8 ± 0.4 млн лет (Прил. 1, табл. 1.2; рис. 3, г). Поскольку каких-либо наложенных изменений при изучении шлифов обнаружено не было, цирконы имеют высокие значения Th/U соотношений и возраст двух выделенных типов зерен циркона совпадает в пределах ошибки, полученную датировку следует считать возрастом кристаллизации гранодиорита.

В связи с молодым возрастом гранитоидов и, соответственно, очень низкой концентрацией ^{235}U в цирконе во время его формирования для расчета возраста пород и построения графиков (рис. 3, б, в, г) использовались данные по системе $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Средневзвешенный возраст каждого образца, полученный по выборке из высококонкордантных (>90 %) значений, в пределах ошибки совпадает с результатом для полной совокупности.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные U-Pb датировки циркона показывают, что биотит-амфиболовый гранодиорит (X17-27), отнесенный ко второй фазе бекчиулского комплекса, кристаллизовался 73.8 ± 0.4 млн лет назад, а амфибол-биотитовый гранит третьей фазы (X17-24-1a) – 66.2 ± 0.3 млн лет назад (рис. 3, в, г). При этом в граните присутствует немногочисленная популяция цирконов с возрастом 75.6 ± 0.6 млн лет (рис. 3, б), т.е. близким ко времени формирования гранодиоритов второй фазы. Таким образом, можно сделать вывод, что формирование Бекчиулского массива происходило как минимум в два этапа – около 76–73 млн лет и около 66 млн лет. При этом граниты позднего этапа унаследовали цирконы ранних гранитоидов. Полученные датировки попадают в периоды повышенной магматической активности, фиксируемые по результатам исследований более южных частей Сихотэ-Алинского орогенного пояса [Wu et al., 2022b].

При K-Ar датировании адуляра месторождения Многовершинного были получены три значения, отражающие две синхронные с гранитоидным магматизмом стадии рудообразования – 75.4 ± 2.0 , 66.9 ± 2.4 и 66.4 ± 1.8 млн лет [Khomich et al., 2018]. Кроме того, для двух образцов адуляра был получен возраст 71.9 ± 2.4 и 71.1 ± 2.0 млн лет [Khomich et al., 2018]. Не исключено, что эти адуляры датируют еще один импульс магматизма, и в пределах Бекчиулского плутона присутствуют гранитоиды того же возраста.

По своим геохимическим особенностям породы в целом соответствуют типичным надсубдукционным гранитоидам, хотя имеющиеся данные не позволяют сделать окончательный вывод. Образец гранита имеет несколько повышенную глиноземистость и попадает в поле гранитоидов S-типа (см. рис. 2, в), что, однако, не подтверждается минеральным составом.

На основании исследований различных аспектов геологии Сихотэ-Алинского орогенного пояса установлено, что в позднем мелу на северо-западной окраине

Пацифики действовал режим субдукции [Khanchuk et al., 2016; Kemkin et al., 2016; Wu et al., 2022a; и др.]. Новейшие геодинамические модели свидетельствуют, что в позднем мелу под данный фрагмент Восточной Азии происходила субдукция плиты Изанаги (например [Wu et al., 2022a] и ссылки в данной работе). По поводу надсубдукционной природы позднемелового Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса (ВСАВПП), в состав которого входит Бекчиулский плутон, также существует относительный консенсус [Grebennikov et al., 2016; Martynov et al., 2017; Liu et al., 2020; Wu et al., 2022b; и др.]. Однако северная часть пояса изучена слабее, особенно самый его север – Нижнее Приамурье. Альтернативная точка зрения была высказана по результатам исследований позднемеловых вулканитов больбинской свиты, что вследствие существовавшей в позднем мелу конфигурации континентальной окраины, часть ВСАВПП, расположенная к северу примерно от 48–49-й параллели, формировалась в несубдукционном режиме трансформной континентальной окраины [Martynov et al., 2019]. Другие исследователи, изучавшие особенности магматических пород данного района находят более убедительными аргументы в пользу их надсубдукционного происхождения [Wu et al., 2022b].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гранодиориты Бекчиулского интрузивного массива, отнесенные ко второй фазе одноименного комплекса, сформировались около 73.8 ± 0.4 млн лет назад. Граниты третьей фазы бекчиулского комплекса образовались на рубеже 66.2 ± 0.3 млн лет. При этом последние содержат немногочисленные зерна циркона, близкие по возрасту гранодиоритам – 75.6 ± 0.6 млн лет. Магматическим импульсам около 76–73 млн лет и около 66 млн лет синхронны стадии рудообразования Многовершинного золотосеребряного месторождения, соответствующие возрасту адуляра из рудных зон, полученному ранее K-Ar методом [Khomich et al., 2018]. Формирование гранитоидов и связанное с ними рудообразование, вероятно, происходили в результате субдукции плиты Изанаги под окраину континента. Для реконструкции истории формирования сложного Бекчиулского плутона и Многовершинного месторождения необходимы дополнительные геохронологические и геохимические исследования.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны рецензентам за внимательное рассмотрение рукописи и сделанные замечания.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Anders E., Grevesse N., 1989. Abundances of the Elements: Meteoritic and Solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53 (1), 197–214. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90286-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X).

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology* 42 (11), 2033–2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>.

Grebennikov A.V., Khanchuk A.I., Gonevchuk V.G., Kovalenko S.V., 2016. Cretaceous and Paleogene Granitoid Suites of the Sikhote-Alin Area (Far East Russia): Geochemistry and Tectonic Implications. *Lithos* 261, 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.12.020>.

Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology* 211 (1–2), 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>.

Kemkin I.V., Khanchuk A.I., Kemkina R.A., 2016. Accretionary Prisms of the Sikhote-Alin Orogenic Belt: Composition, Structure and Significance for Reconstruction of the Geodynamic Evolution of the Eastern Asian Margin. *Journal of Geodynamics* 102, 202–230. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.10.002>.

Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N., 2016. The Sikhote-Alin Orogenic Belt, Russian South East: Terranes and the Formation of Continental Lithosphere Based on Geological and Isotopic Data. *Journal of Asian Earth Sciences* 120, 117–138. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.10.023>.

Khomich V.G., Boriskina N.G., Fatyanov I.I., Santosh M., 2018. Characteristics and Genesis of the Mnogovershinnoe Gold-Silver Deposit, SE Russia. *Ore Geology Reviews* 103, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.017>.

Liu K., Zhang J., Xiao W., Wilde S.A., Alexandrov I., 2020. A Review of Magmatism and Deformation History along the NE Asian Margin from ca. 95 to 30 Ma: Transition from the Izanagi to Pacific Plate Subduction in the Early Cenozoic. *Earth-Science Reviews* 209, 103317. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103317>.

Martynov A.Yu., Golozubov V.V., Martynov Yu.A., Kasatkin S.A., 2019. Lateral Zonality of the East Sikhote-Alin Volcanic Belt: Geodynamic Regime in the Late Cretaceous. *Russian Journal of Pacific Geology* 13, 265–282. <https://doi.org/10.1134/S1819714019030060>.

Martynov Yu.A., Khanchuk A.I., Grebennikov A.V., Chashchin A.A., Popov V.K., 2017. Late Mesozoic and Cenozoic Volcanism of the East Sikhote-Alin Area (Russian Far East): A New Synthesis of Geological and Petrological Data. *Gondwana Research* 47, 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.01.005>.

Peccerillo A., Taylor S.R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58, 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2016. Far Eastern Series. Scale 1:1000000. Sheet N-54 (Nikolayevsk-on-Amur). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 477 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Дальневосточная. Масштаб 1:1000000. Лист N-54 (Николаевск-на-Амуре): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016. 477 с.].

Vermesch P., 2018. IsoplotR: A Free and Open Toolbox for Geochronology. *Geoscience Frontiers* 9 (5), 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>.

Wu J., Lin Y.-A., Flament N., Wu J.T.-J., Liu Y., 2022a. Northwest Pacific-Izanagi Plate Tectonics since Cretaceous Times from Western Pacific Mantle Structure. *Earth and Planetary Science Letters* 583, 117445. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117445>.

Wu J.T.-J., Wu J., Alexandrov I., Lapen T., Lee H.-Y., Ivin V., 2022b. Continental Growth during Migrating Arc Magmatism and Terrane Accretion at Sikhote-Alin (Russian Far East) and Adjacent Northeast Asia. *Lithos* 432–433, 106891. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106891>.

Zalishchak B.L., Petrachenko R.N., Piskunov Yu.G., Beda V.D., Zarembskiy E.P., Pakhomova V.A., 1978. Major Features of Formation of the Ul Volcanic-Plutonic Structure (Lower Amur River). In: *The Genesis of Endogenous Mineralization in the Far East*. Vladivostok, p. 130–139 (in Russian) [Залищак Б.Л., Петраченко Р.Н., Пискунов Ю.Г., Беда В.Д., Зарембский Е.П., Пахомова В.А. Основные черты формирования Улской вулcano-плутонической структуры (Нижнее Приамурье) // Генезис эндогенной минерализации Дальнего Востока. Владивосток, 1978. С. 130–139].

Zalishchak B.L., Piskunov Yu.G., 1983. Petrography of the Igneous Rocks of the Ul Volcanic-Plutonic Structure (Lower Amur River). In: *New Data on Mineralization of the Mongol-Okhotsk Belt*. Vladivostok, p. 110–142 (in Russian) [Залищак Б.М., Пискунов Ю.Г. Петрография интрузивных пород Улской вулcano-плутонической структуры (Нижнее Приамурье) // Новые данные по геологии рудоносности Монголо-Охотского пояса. Владивосток, 1983. С. 110–142].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Химический состав гранитоидов Бекчиулского плутона

Table 1.1. Chemical composition of granitoids from the Bekchiul pluton

Обр.	X17-24-1a	X17-24-16	X17-24-26	X17-27	X17-29	Обр.	X17-24-1a	X17-24-16	X17-24-26	X17-27	X17-29
SiO ₂	67.95	64.6	73.04	68.32	61.27	Ba	615	621	321	493	961
TiO ₂	0.4	0.47	0.28	0.37	0.45	La	32.4	33.6	42.2	16.8	22.2
Al ₂ O ₃	15.7	17.08	13.78	14.65	16.34	Ce	61.6	62.2	80.9	39.7	43.3
Fe ₂ O ₃	2.01	2.36	1.19	2.28	5.61	Pr	7.6	7.13	8.55	5.11	4.57
FeO	1.16	1.57	0.68	1.03	н.о	Nd	32.1	30.7	28.3	19.4	17.1
MnO	0.12	0.19	0.07	0.08	0.16	Sm	5.37	5.34	4.59	4	3.18
MgO	0.89	1.28	0.43	1.16	1.91	Eu	0.91	1.26	0.58	0.69	0.95
CaO	1.67	3.1	1.09	2.39	3.73	Gd	4.08	4.17	3.76	3.16	2.88
Na ₂ O	4.3	4.61	3.92	3	3.45	Tb	0.63	0.62	0.44	0.42	0.37
K ₂ O	4.07	3.08	4.29	5.13	4.38	Dy	3.32	3.19	2.63	2.75	1.92
P ₂ O ₅	0.24	0.25	0.1	0.13	0.31	Ho	0.62	0.6	0.49	0.53	0.36
H ₂ O ⁻	0.25	0.27	0.17	0.18	0.12	Er	1.91	1.89	1.35	1.45	1.1
ППП	0.81	0.84	0.74	0.91	2.37	Tm	0.25	0.27	0.22	0.24	0.16
Σ	99.57	99.71	99.78	99.62	100.1	Yb	1.66	1.95	1.29	1.39	1.1
Rb	116	109	133	173	106	Lu	0.21	0.27	0.2	0.3	0.16
Sr	268	474	183	308	713	Hf	10.1	4.16	6.47	5.78	3.12
Y	21.4	15	15.9	17.6	21.4	Ta	1.09	0.72	1.27	1.28	0.35
Zr	311	150	207	170	232	Pb	18.4	17.7	16.3	19.3	14.2
Nb	15.7	13	13.9	12.2	8.3	Th	12.6	13.4	18.9	26.9	11.1
Cs	4.17	4.9	4.3	11.19	7.36	U	3.09	2.83	1.98	3.34	2.97

Таблица 1.2. Данные U-Pb датирования цирконов

Table 1.2. U-Pb zircon data

№	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	Возраст, млн лет				Конкор- дантность, %
								²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	
Образец X17-24-1a: 66.2±0.3 млн лет (1σ); 53°55'17.58" с.ш., 140°2'16.44" в.д.												
1	0.82	0.06746	0.00336	0.01014	0.0002	0.04825	0.0025	65.0	1.3	66.3	3.2	98
2	1.34	0.07423	0.00237	0.01068	0.00017	0.05039	0.00168	68.5	1.1	72.7	2.2	94
3	1.11	0.06993	0.00283	0.01034	0.00018	0.04903	0.00207	66.3	1.2	68.6	2.7	97
4	0.79	0.0671	0.00409	0.01052	0.0002	0.04627	0.00289	67.5	1.3	65.9	3.9	98
5	1.51	0.08391	0.00431	0.01036	0.00022	0.05873	0.00319	66.4	1.4	81.8	4.0	81
6	0.97	0.09818	0.00315	0.0108	0.00019	0.06592	0.00226	69.3	1.2	95.1	2.9	73
7	1.37	0.06889	0.01204	0.01012	0.00041	0.04937	0.00884	64.9	2.6	67.6	11.4	96
8	0.82	0.07893	0.00384	0.01006	0.00018	0.0569	0.00293	64.5	1.2	77.1	3.6	84
9	1.28	0.15567	0.0214	0.01051	0.00059	0.10745	0.01593	67.4	3.8	146.9	18.8	46
10	0.96	0.07827	0.0052	0.01059	0.00022	0.05359	0.00371	67.9	1.4	76.5	4.9	89
11	1.21	0.07465	0.00399	0.01023	0.00019	0.0529	0.00297	65.6	1.2	73.1	3.8	90
12	0.75	0.07791	0.0033	0.01011	0.00017	0.05588	0.00253	64.9	1.1	76.2	3.1	85
13	0.66	0.07482	0.00378	0.01037	0.0002	0.05233	0.00281	66.5	1.3	73.3	3.6	91
14	0.93	0.08806	0.00498	0.01018	0.00022	0.06272	0.00377	65.3	1.4	85.7	4.7	76
15	0.70	0.0712	0.00477	0.01002	0.00025	0.05153	0.00367	64.3	1.6	69.8	4.5	92

Таблица 1.2 (продолжение)

Table 1.2 (continued)

№	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	Возраст, млн лет				Конкордантность, %
								$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
16	0.98	0.10077	0.00554	0.01015	0.00024	0.07201	0.00428	65.1	1.5	97.5	5.1	67
17	0.91	0.07429	0.00294	0.01019	0.00014	0.05286	0.00221	65.4	0.9	72.8	2.8	90
18	1.33	0.07927	0.005	0.01163	0.00022	0.04944	0.00325	74.5	1.4	77.5	4.7	96
19	1.44	0.08599	0.01203	0.01186	0.0004	0.05256	0.00756	76.0	2.6	83.8	11.2	91
20	1.30	0.07746	0.00326	0.01177	0.00016	0.04772	0.00211	75.4	1.0	75.8	3.1	100
21	0.97	0.07797	0.00336	0.01175	0.00017	0.04812	0.00219	75.3	1.1	76.2	3.2	99
22	1.37	0.11499	0.00582	0.01201	0.00021	0.06945	0.0037	77.0	1.3	110.5	5.3	70
Образец X17-27: 73.8±0.4 млн лет (1σ); 53°53'36.70" с.ш., 139°56'26.27" в.д.												
1	0.90	0.0774	0.0064	0.01146	0.00035	0.04898	0.00425	73.5	2.2	75.7	6.0	97
2	0.76	0.08997	0.01051	0.01157	0.00047	0.05638	0.00691	74.2	3.0	87.5	9.8	85
3	0.69	0.0886	0.00939	0.0113	0.0004	0.05685	0.00629	72.4	2.6	86.2	8.8	84
4	0.57	0.09541	0.00764	0.01146	0.00029	0.0604	0.00498	73.5	1.9	92.5	7.1	79
5	0.64	0.1427	0.01715	0.01174	0.00059	0.08813	0.0114	75.2	3.8	135.4	15.2	56
6	0.75	0.08145	0.01132	0.01132	0.0005	0.05217	0.00756	72.6	3.2	79.5	10.6	91
7	0.70	0.07484	0.01054	0.01114	0.00047	0.0487	0.00712	71.4	3.0	73.3	10.0	97
8	0.69	0.08393	0.00996	0.01151	0.00036	0.05287	0.00643	73.8	2.3	81.8	9.3	90
9	0.62	0.08002	0.00772	0.01163	0.00028	0.04991	0.0049	74.5	1.8	78.2	7.3	95
10	0.77	0.11026	0.01207	0.01142	0.00033	0.07003	0.00785	73.2	2.1	106.2	11.0	69
11	0.68	0.08149	0.00716	0.01142	0.00029	0.05176	0.00467	73.2	1.9	79.5	6.7	92
12	0.64	0.06649	0.00696	0.01141	0.00033	0.04227	0.00455	73.1	2.1	65.4	6.6	88
13	0.65	0.08158	0.00649	0.0115	0.00028	0.05144	0.00422	73.7	1.8	79.6	6.1	93
14	0.72	0.1752	0.00609	0.01143	0.00022	0.11117	0.00417	73.3	1.4	163.9	5.3	45
15	0.62	0.06927	0.00656	0.01135	0.00025	0.04427	0.00426	72.8	1.6	68.0	6.2	93
16	0.69	0.06564	0.00904	0.01137	0.00029	0.04185	0.00583	72.9	1.9	64.6	8.6	87
17	0.66	0.08434	0.00567	0.01149	0.00025	0.05325	0.0037	73.7	1.6	82.2	5.3	90
18	0.69	0.10467	0.00575	0.01163	0.00023	0.06526	0.0037	74.5	1.5	101.1	5.3	74
19	0.99	0.07856	0.00375	0.0117	0.00021	0.0487	0.0024	75.0	1.3	76.8	3.5	98
20	0.62	0.11578	0.00769	0.01151	0.0003	0.07297	0.00511	73.8	1.9	111.2	7.0	66
21	0.75	0.07173	0.00475	0.01172	0.00022	0.0444	0.003	75.1	1.4	70.3	4.5	93
22	0.70	0.07642	0.0044	0.01147	0.00023	0.04833	0.00288	73.5	1.5	74.8	4.2	98
23	0.68	0.06947	0.00488	0.01149	0.00024	0.04387	0.00316	73.7	1.5	68.2	4.6	92
24	0.66	0.06985	0.00444	0.01152	0.00024	0.04399	0.00289	73.8	1.5	68.6	4.2	92
25	0.71	0.07619	0.00691	0.01159	0.00039	0.04769	0.00456	74.3	2.5	74.6	6.5	100
26	0.84	0.07076	0.00843	0.01178	0.00042	0.04357	0.00538	75.5	2.7	69.4	8.0	91
27	0.85	0.07713	0.01095	0.0116	0.0005	0.04822	0.00712	74.4	3.2	75.4	10.3	99
28	0.56	0.12191	0.00812	0.01168	0.00032	0.07568	0.00535	74.9	2.0	116.8	7.4	64
29	0.72	0.08425	0.00562	0.01152	0.00027	0.05306	0.00369	73.8	1.7	82.1	5.3	90