

ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК: [552.321.1/4: 551.763.1(571.651)]

РАННЕМЕЛОВЫЕ ГРАНИТОИДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ОЛОЙСКОЙ ЗОНЫ (Западная Чукотка)

Коновалов А. Л.¹, Черкашин А. В.¹, Старикова Е. В.¹, Сурин Т. Н.¹, Гагиева А. М.²

¹ ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. академика А. П. Карпинского, г. Санкт-Петербург

² ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

E-mail: Aleksandr_Kononov@karpinskyinstitute.ru, gagieva@neisri.ru

Приведены новые данные о возрасте, составе и строении гранитоидных массивов, расположенных в восточной части Олойской зоны, ранее относимых к олойскому и яблонскому плутоническим комплексам Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса. Для ряда массивов прецизионными методами датирования (U–Pb, SHRIMP-II) установлены возрастные значения в интервале 147–138 млн л., соответствующие заключительному этапу развития Алазейско-Олойской складчатой системы. Обсуждаются результаты геолого-петрохимического и геохронометрического изучения интрузивных массивов, их позиция относительно позднеюрско-раннемеловых надсубдукционных магматических поясов Олойской и Удско-Мургальской дуговых систем.

Ключевые слова: Алазейско-Олойская складчатая система, гранитоиды, U–Pb геохронология, петрогеохимия, изотопные исследования, тектоника, вулканические дуги, коллизия, Западная Чукотка.

DOI: 10.34078/1814-0998-2024-2-3-25

ВВЕДЕНИЕ

Гранитоидные комплексы, охарактеризованные ниже, распространены на территории, расположенной в зоне сочленения двух крупнейших на Северо-Востоке России тектонических структур – Алазейско-Олойской складчатой системы (АОСС) Верхояно-Чукотской складчатой области (ВЧСО) и Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса (ОЧВП), формировавшихся в зоне перехода континент–океан (рис. 1).

Различные аспекты геологического строения данных структур отражены в многочисленных публикациях ведущих геологов Северо-Востока – В. В. Акинина, В. Ф. Белого, Ю. А. Билибина, А. А. Богданова, Л. П. Зоненшайна, И. Н. Котляра, П. П. Лычагина, В. Т. Матвеевского, В. М. Мерзлякова, Б. А. Натальина, Л. М. Натапова, Л. М. Парфенова, Т. Б. Русаковой, С. Д. Соколова, С. М. Тильмана, П. Л. Тихомирова, Р. Б. Умитбаева, Е. К. Устиева, А. И. Ханчука, А. Д. Чехова, Н. С. Шатского, Н. А. Шило, В. И. Шпикермана и др. Ряд исследователей приходят к заключению о мозаичном строении Верхояно-Чукотской

складчатой области, состоящей из разнородных блоков (или террейнов). На схеме тектонического районирования территории России масштаба 1 : 5 000 000 центральные районы мезозойской эры представлены как Колымо-Омолонская аккреционно-коллизонная область (Гусев и др., 2001).

Алазейско-Олойская складчатая система (рис. 1) разделена на Алазейскую и Олойскую зоны, занимающие соответственно ее западную и восточную части (Русаков, Виноградов, 1969; Шило и др., 1973). Алазейская зона ограничена с трех сторон структурами Индигиро-Колымской складчатой системы, образованной блоками (зонами) длительного развития, сложенными преимущественно вендско-палеозойскими карбонатными и терригенно-карбонатными структурно-вещественными комплексами пассивной окраины и карбонатных платформ. Имеющиеся палеомагнитные данные позволяют предполагать размещение блоков пассивной окраины Индигиро-Колымской складчатой системы в едином мегаблоке с Сибирской плитой, начиная со среднего девона (Соколов и др., 1997). Олойская зона с юга граничит со структурами Омолонского массива, на севере – с Южно-Анжуйской складчатой системой (сутурой, см. (Соколов и др., 2021)), с востока перекрыта вул-

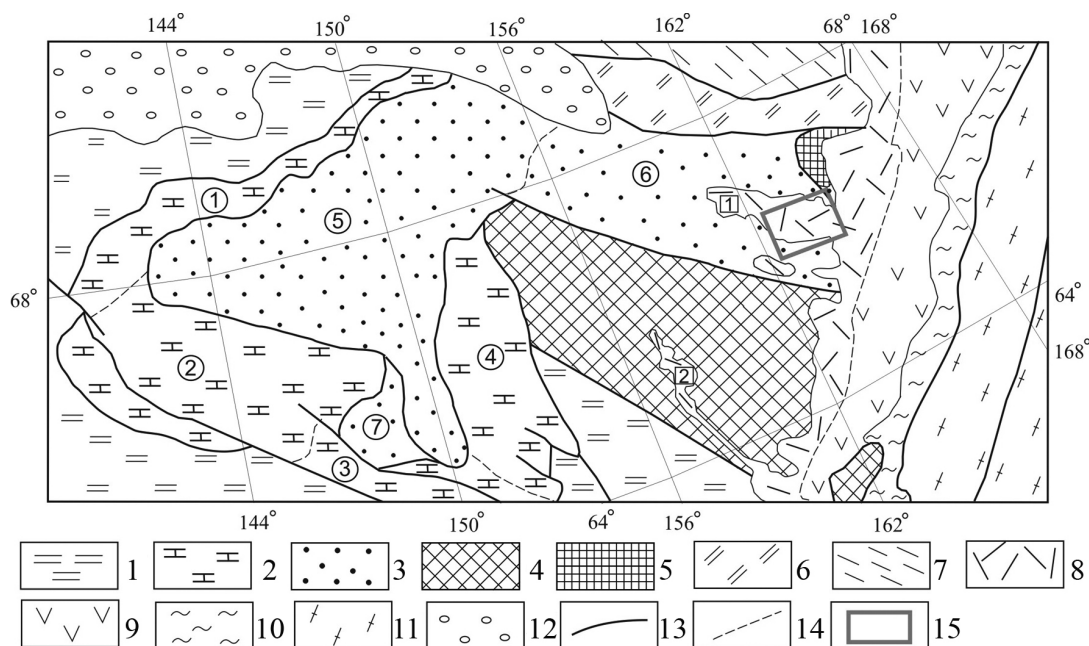


Рис. 1. Схема основных тектонических элементов Алазейско-Олойской складчатой системы и окружающих мезозойд; составлена по: Мерзляков (1982), Парфенов (1984), Соколов (1997) и материалам А. П. Кропачев, И. М. Мигович, В. И. Шпикерман и др., из неизданной монографии (Геология и полезные ископаемые России. Восток России, 2015), с упрощениями. 1–7 – Верхояно-Чукотская складчатая (мозаичная) область: 1 – Яно-Колымская складчатая система, 2 – Индигиро-Колымская складчатая система, 3 – Алазейско-Олойская складчатая система (без кайнозойского чехла), 4 – Омолонский массив и Чекурский тектонический блок, 5 – Яблонский тектонический блок, 6 – Южно-Ануйская складчатая система (сутура), 7 – Ануйско-Чукотская складчатая система; 8, 9 – Охотско-Чукотский вулканоплутонический пояс (ОЧВП): 8 – внешняя зона, 9 – внутренняя зона; 10 – Кони-Мургалская складчатая система (Удско-Мургалская дуга); 11 – Корьякско-Камчатская складчатая область; 12 – кайнозойские наложенные впадины; 13 – граница основных тектонических структур; 14 – граница зон; 15 – район геологического доизучения листа Госгеолкарты-200 Q-58-XXI, XXII (Верхне-Олойская площадь). Цифры в кружках: 1–4 – Индигиро-Колымская складчатая система, складчатые зоны: 1 – Улахан-Сисская, 2 – Тас-Хаяхтасская и Уяндино-Ясачненская, 3 – Тасканская, 4 – Приколымская; 5–7 – Алазейско-Олойская складчатая система: 5 – Алазейская, 6 – Олойская складчатые зоны, 7 – Рассошинско-Аргатасский блок (террейн). Цифры в квадратах – Нембондинская (1) и Конгинская (2) поперечные вулканические зоны.

Fig. 1. Main tectonic element scheme of the Alazeya-Oloy folded system and the surrounding mesozooids; compiled from: Merzlyakov (1982), Parfenov (1984), Sokolov (1997), and materials from the unpublished monograph by A. P. Kropachev, I. M. Migovich, V. I. Shpikerman et al. (Geology and Mineral Resources of Russia. Russia's East, 2015), with simplifications. 1–7 – Verkhoyansk-Chukotka folded (mosaic) region: 1 – Yana-Kolyma folded system, 2 – Indigirka-Kolyma folded system, 3 – Alazeya-Oloy folded system (without its Cenozoic cover), 4 – Omolon massif and Chekur tectonic block, 5 – Yablon tectonic block, 6 – South Anyuy folded system (suture), 7 – Anyuy-Chukotka fold system; 8, 9 – Okhotsk-Chukotka volcanic-plutonic belt (OCVP): 8 – external zone, 9 – internal zone; 10 – Koni-Murgal folded system (Uda-Murgal arc); 11 – Koryak-Kamchatka folded region; 12 – Cenozoic superimposed depressions; 13 – boundary of the main tectonic structures; 14 – zone boundaries; 15 – area of further geological study of Gosgeolcarta-200 sheet Q-58-XXI, XXII (Upper Oloy area). Circled numbers: 1–4 – Indigirka-Kolyma folded system, folded zones: 1 – Ulakhan-Sis, 2 – Tas-Khayakhtakh and Uyandina-Yasachnnaya, 3 – Taskan, 4 – Prikolymye; 5–7 – Alazeya-Oloy folded system: 5 – Alazeya folded zone, 6 – Oloy folded zone, 7 – Rassoshino-Argatas block (terrane). Numbers in the squares are the Nembonda (1) and Kongin (2) transverse volcanic zones.

канитами ОЧВП, которые маскируют характер ее сочленения со структурами Удско-Мургалской дуговой системы. В поздней юре – раннем мелу (неокоме) Олойская зона развивалась в режиме вулканической дуги континентальной окраины (Парфенов, 1991); в отличие от окраин андийского типа здесь формирование происходит в субаквальных условиях (Соколов и др., 2021).

Охотско-Чукотский вулканоплутонический пояс (средний альб – кампан) характеризуется продольной и поперечной неоднородностью. Согласно представлениям В. Ф. Белого (1978, 1994 и

др.), в строении ОЧВП выделяются продольные внутренняя и внешняя зоны. Внутренняя (в современной терминологии – фронтальная, приокеаническая) зона залегает на складчатом верхнепалеозойском или мезозойском основании и, очевидно, наследует структуры Удско-Мургалской дуговой системы (Соколов, 2010; Акинин, Миллер, 2011). Внешняя (тыловая, приконтинентальная) зона характеризуется неоднородностью состава и строения вулканических накоплений (за счет гетерогенности структур основания ОЧВП) и разделяется на поперечные структуры – Ана-

дырский, Центральнo-Чукотский и др. сегменты (или секторы) и Западно-Охотский и Восточно-Чукотский фланговые зоны.

Структуры Олойской зоны и ОЧВП осложнены серией прогибов (впадин), заполненных как осадочными породами – Айнахургенская, Умкунеевская и др., так и вулканогенными – Тытыльвеевская, Мангазейская и др. Терригенные толщи сложены грубообломочными породами – так называемой «предвулканогенной молассой» по В. Ф. Белому (1978), апт-альбского возраста согласно определениям остатков флоры (Фурман, 1999; Исаева и др., 2019).

Возраст вулканитов Тытыльвеевской впадины определен результатами U–Pb (SHRIMP-II) датирования циркона как аптский – 121.4 ± 2.8 и 118.0 ± 2.0 млн л. (Тихомиров и др., 2017); для вулканитов, расположенных на значительном удалении, в северо-западной части Тытыльвеевского вулканического пояса, получены альбские датировки – 105 млн л. (Tikhomirov et al., 2023). Вулканиты Мангазейской впадины на сегодняшний день охарактеризованы Rb–Sr методом; имеющаяся датировка – 117 ± 12 млн л., с учетом погрешности отвечает интервалу от баррема до альба (Комарова и др., 2013; Тихомирова и др., 2017).

Нембондинский прогиб ранее рассматривался как перивулканическая структура ОЧВП; слагающие его вулканогенные образования, согласно определениям остатков флоры альбского возраста (Фурман, 1999; Исаева и др., 2019), проникают в мезозойды Олойской зоны на 250 км. Новейшие материалы U–Pb (SHRIMP-II) датирования ограничивают возраст вулканитов интервалом от апта до альба – 123–99 млн л. (Старикова, Коновалов и др., 2023).

В настоящей публикации представлены новые данные о гранитоидных интрузивах, расположенных на востоке Олойской зоны, за пределами Нембондинского прогиба. Согласно материалам Госгеолкарты-1000/3 листа Q-58 – Алискерово (Исаева и др., 2019) данные интрузивные образования относятся к олойскому и яблонскому комплексам раннемелового (альбского) возраста. Полученные нами результаты U–Pb (SHRIMP-II) датирования гранитоидных интрузивов, анализ геохимического состава слагающих их образований позволяют выделить здесь ряд массивов доальбского возраста; рассматривается возможность выделения двух новых плутонических комплексов. Приводится краткий обзор опубликованных материалов различных авторов по датированию (преимущественно U–Pb методом) интрузивных образований, относимых к раннемеловым (доальбским) комплексам.

ОБЗОР ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О РАННЕМЕЛОВОМ ИНТРУЗИВНОМ МАГМАТИЗМЕ

Начало системного изучения гранитоидного магматизма Западной Чукотки было положено при геологосъемочных работах масштабов

1 : 200 000 и 1 : 50 000, проводимых ПГО «Сев-востокгеология» и Аноуйской ГРЭ в 60–90-е гг. прошлого столетия. Итоговые результаты представлены в отчетах Ю. И. Евстафьева, Е. К. Зотова, Э. С. Копытова, К. Б. Куликова, Г. А. Поданева, В. П. Фомина, А. С. Бочкарева и др. В дальнейшем различные стороны интрузивного магматизма Чукотского региона освещались в отечественных и зарубежных публикациях (Берлибле и др., 1975; Белый, 1978; Парфенов, 1984; Акинин, Миллер, 2011; Amato et al., 2015; Тихомиров и др., 2017 и мн. др.). Представления об эволюции позднемезозойского магматизма палеотихоокеанской окраины Сибири, основанные на результатах современных аналитических методов, содержатся в работах В. В. Акинина (Akinin et al., 2020) и П. Л. Тихомирова (2020).

Изначально раннемеловые гранитоидные интрузии Западной Чукотки были расчленены на ряд магматических комплексов, в том числе олойский интрузивный комплекс (Берлибле и др., 1971) и яблонскую серию (комплекс) (Милов, 1984). Интрузии олойского комплекса распространены в восточной части Олойской зоны АОСС, яблонского – преимущественно во внешней зоне ОЧВП. В последнем издании Госгеолкарты листа Q-58 – Алискерово возраст комплексов принят альбским на основании взаимоотношений со вмещающими «поясовыми» вулканитами: интрузии олойского габбро-гранодиорит-гранитового комплекса прорывают раннеальбские вулканиты дигривеевской толщи; массивы яблонского гранодиоритового (гранодиорит-гранитового) комплекса перекрываются еропольской свитой сеноманского возраста (Исаева и др., 2019). Имеющиеся K–Ar датировки варьируют в широких пределах; для пород олойского комплекса от 136 до 84 млн л., яблонского – от 98 до 91 млн л. (Акинин, Котляр, 1997; Фурман, 1999).

Севернее района исследований (левобережье р. Бол. Аноуй) распространены раннемеловые (неокомовые) егдэгкычский монцонит-сиенитовый и весеннинский диоритовый комплексы (Берлибле, Калныня, 1971). Изотопные значения возраста пород комплексов получены U–Pb (SHRIMP-II) методом по циркону для Баимской рудной зоны, включающей медно-порфировые и эпitherмальные золото-серебряные месторождения Песчанка, Находка, Весенний. Егдэгкычский комплекс охарактеризован датировками, полученными по монцодиоритам Егдэгкычского (петротип), Ничанского и Вукнейского массивов – 144–135 млн л., берриас-валанжин (Котова и др., 2012; Amato et al., 2015; Читалин и др., 2016; Кара, 2018; Лучицкая и др., 2018). Близкие значения возраста установлены для интрузивных тел егдэгкычского комплекса, распространенных на правобережье р. Омолон и в бассейне верхнего течения р. Яровая – 140–133 млн л. (Кузнецов и др., 2022).

Интрузии весеннинского комплекса имеют ограниченное распространение; их выходы сосредоточены в зоне Алучинского разлома, где они соседствуют с массивами егдэгкычского комплекса. Для диоритовых порфиритов весеннинского комплекса, слагающих малые интрузивные тела, получены U–Pb датировки 143.4 и 140.6 млн л., берриас (Читалин и др., 2016). Приведенные данные показывают, что в целом егдэгкычский и весеннинский комплексы характеризуются близкими значениями изотопного возраста, при этом отмечается, что слагающие их породы различаются по петрографическому составу и формационной принадлежности (Читалин и др., 2016).

В юго-восточной части Олойской зоны и в пределах Намындыкано-Моланджинской зоны (Омолонского массива) распространены раннемеловые интрузии намындыканского (монцо)габбро-диорит-гранодиоритового комплекса. Здесь изотопными датировками охарактеризованы гранитоиды, слагающие Хуличанский, Медленный, Айненэнский массивы; имеющиеся материалы U–Pb (SHRIMP-II) датирования ограничивают возраст комплекса интервалом 143–136 млн л. (Шатова, Серегин, 2022; Кузнецов и др., 2022).

МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основой данной работы служат геологические наблюдения и аналитические (геолого-геохимические и геохронологические) материалы, полученные по образцам коллекций сотрудников полевой партии ВСЕГЕИ, проводившей в течение полевых сезонов 2019–2020 гг. геологосъемочные работы на Верхнеолойской площади (Q-58-XXI-XXII). Новые данные, полученные по раннемеловому интрузивному магматизму Олойско-Алучинского междуречья Западной Чукотки, позволили выделить Трехглавый и Кейэттынский участки, в границах которых установлены интрузии с изотопными датировками, противоречащими общепринятому возрасту выделяемых здесь комплексов (рис. 2).

Химико-аналитические (19 образцов) и изотопно-геохронологические (8 образцов) исследования выполнены на базе Центральной лаборатории и Центра изотопных исследований ВСЕГЕИ. Рентгенофлуоресцентный (силикатный) анализ содержаний главных окислов и элементов в интрузивных и вулканогенных образованиях произведен на спектрометре ARL-980; содержания FeO установлены титрованием. Масс-спектрометрический анализ с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS), включающий определения редкоземельных элементов и элементов-примесей в интрузивных породах, выполнен на спектрометрах Elan 6100, Agilent 7700.

Изотопно-геохронологические исследования осуществлены с использованием U–Pb метода локального датирования по цирконам при

помощи вторично-ионного масс-спектрометра SHRIMP-II (аналитики А. Н. Ларионов, Е. Н. Лепехина, П. А. Львов, Н. В. Родионов). Измерения изотопных отношений проводились по принятой методике, описанной в работе Я. Вильямса (1998). Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приняты на уровне 1σ , погрешности вычисленных возрастов (в том числе конкордантных) – на уровне 2σ . Расчет и построение графиков Теры–Вассербурга с конкордией выполнялись в программе ISOPLOT v. 3.41 (Ludwig, 2003). Работы по описанию цирконов проведены Центром изотопных исследований (аналитики Е. Е. Середа, О. В. Вакуленко, Ю. С. Балашова).

Помимо авторских материалов в работе задействованы результаты U–Pb датирования цирконов раннемеловых плутонических и вулканических пород Олойской зоны, Омолонского массива и внешней зоны ОЧВП, содержащиеся в публикациях разных лет (Котова и др., 2012; Amato et al., 2015; Читалин и др., 2016; Тихомиров и др., 2017; Кара, 2018; Лучицкая и др., 2018; Кара и др., 2019; Шатова, Серегин, 2022; Кузнецов и др., 2022; Старикова, Гагиева и др., 2023; Старикова, Коновалов и др., 2023).

Изотопный состав Sr, Nd и Pb в валовом составе пород был измерен на мультиколлекторном твердофазном масс-спектрометре Triton (Thermo) в статическом режиме ЦИИ Геологического института им. А. П. Карпинского (Санкт-Петербург, Россия). Для нормализации были использованы значения $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$ и $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. Разложение образцов и разделение элементов проводили с помощью стандартного метода колонковой ионообменной хроматографии. Контрольные значения бланка при анализе не превышали 0.01 нг для Sm, Nd, Pb и 0.01 и 0.05 для Rb и Sr соответственно. Содержание элементов определяли путем изотопного разбавления с использованием калиброванного изотопного индикатора. Изотопный состав эталонных образцов в процессе измерений составил: JNdi-1: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512105 \pm 0.000004$ и SRM987: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710245 \pm 0.000011$ (погрешность 2σ , абс.).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ УЧАСТКОВ ТРЕХГЛАВЫЙ И КЕЙЭТТЫНСКИЙ

Исследования гранитоидных интрузивов яблонского и олойского плутонических комплексов позволили получить новые данные для ряда массивов, которые по особенностям строения и петрографического состава, взаимоотношениям с вмещающими породами и тектоническими структурами, а также новейшим геохронологическим данным не соответствуют характеристикам, предъявляемым к яблонскому и олойскому комплексам. Установлено, что для таких массивов характерна пространственная приуроченность к «допоясовым» вулканитам Олойской зоны. Выделено два участка – Трехглавый и Кейэттынский (рис. 2),

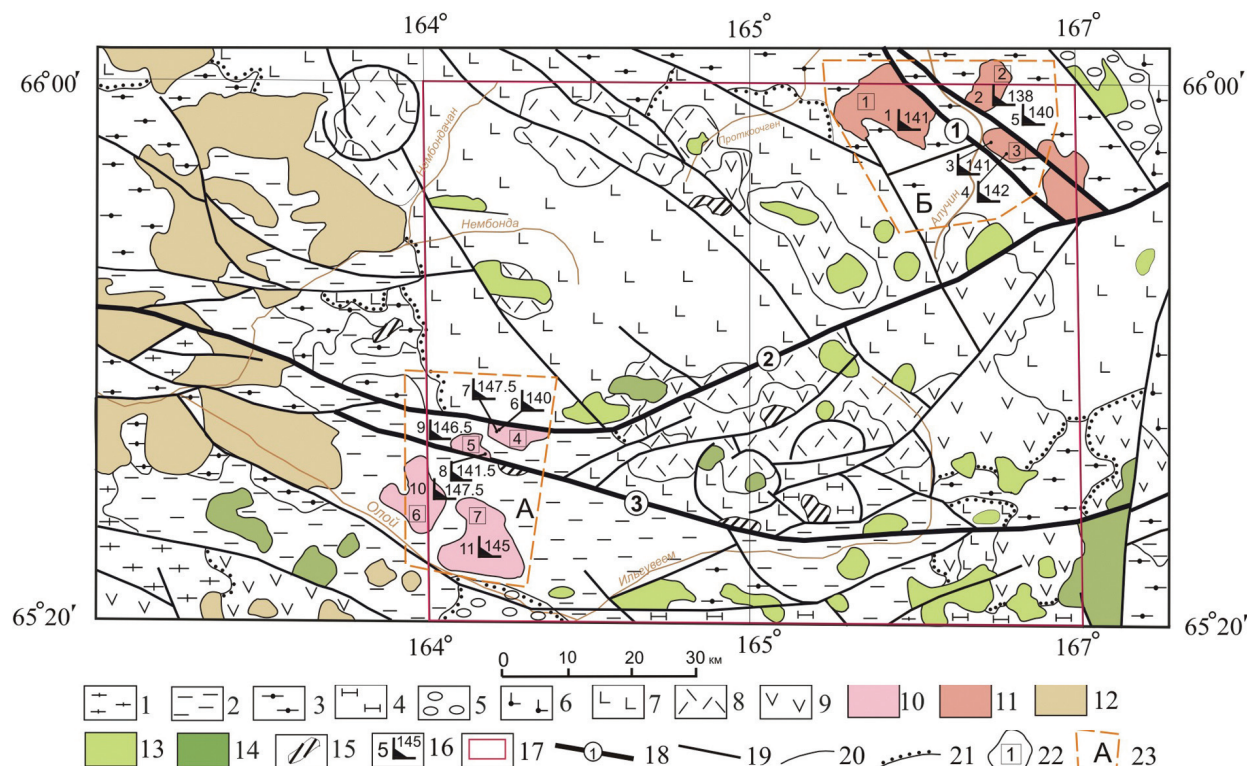


Рис. 2. Геологическая схематическая карта Олойско-Алучинского междуречья; составлена с использованием материалов (Исаева и др., 2019; Старикова, Коновалов и др., 2023). 1–4 – Стратифицированные структурно-вещественные комплексы Алазейско-Олойской складчатой системы (АОСС): 1 – карбонатно-терригенные и терригенные мелководного шельфа окраинного моря (карбон–пермь), 2 – вулканогенные и вулканогенно-терригенные вулканических дуг (кимеридж–титон), 3 – терригенно-вулканогенные и терригенные (вулканомиктовые) вулканических дуг (титон–берриас), 4 – терригенные (вулканомиктовые) и карбонатно-терригенные окраинных и остаточных бассейнов (берриас–готерив); 5, 6 – стратифицированные структурно-вещественные комплексы внешней зоны Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса (ОЧВП): 5 – терригенный «предвулканогенный» молассы с базальтами, 6 – базальтовый (саламихинская свита); 7–9 – Нембондинский вулканический прогиб, меловые вулканогенные комплексы ОЧВП (апт–сеноман (?)): 7 – андезит-базальтовый (илгудеевская толща), 8 – риолит-дацитовый (диргудеевская толща), 9 – базальт-андезитовый (теленеевская толща); 10, 11 – плутонические комплексы АОСС (выделенные впервые): 10 – кейэттынский габбро-гранодиорит-гранитовый, 11 – трехглавый габбро-монзонит-гранодиорит-гранитовый; 12–15 – плутонические комплексы ОЧВП: раннемеловые олойский(?) габбро-гранодиорит-гранитовый (12) и яблонский гранит-гранодиоритовый (13), позднемеловой воронцовский кварцевых монзонитов – умеренно-щелочных гранитов (14), субвулканические дациты и риолиты (15); 16 – точки отбора проб на U–Pb датирование по циркону (цифры – возраст млн л., порядковый номер – см. табл. 3); 17 – район проводимых исследований; 18, 19 – тектонические нарушения: 18 – главные (цифры в кружочках): Алучинский (1), Крестовско-Саламихинский (2), Олойско-Березовский (3), 19 – второстепенные; 20, 21 – геологические границы: 20 – стратиграфические согласные и интрузивных образований, 21 – стратиграфические несогласные; 22 – изученные массивы под номерами (цифры в квадратах): 1 – Трехглавый, 2 – Ржавый, 3 – Вукваамский, 4 – Верхне-Кейэттынский*, 5 – Средне-Кейэттынский, 6 – Ирвеевский, 7 – Нижне-Кейэттынский; 23 – выделенные участки: А – Кейэттынский, Б – Трехглавый.

Fig. 2. Geological schematic map of the Oloy-Aluchin interfluve; compiled using materials from (Isaeva et al., 2019; Starikova, Konovalov, et al., 2023). 1–4 – Stratified structural-material complexes of the Alazeya-Oloy folded system (AOSS): 1 – carbonate-terrigenous and terrigenous complexes of the shallow shelf of the marginal sea (Carboniferous–Permian), 2 – volcanogenic and volcanogenic-terrigenous complexes of volcanic arcs (Kimmeridgian–Tithonian), 3 – terrigenous-volcanogenic and terrigenous (volcanomictic) complexes of volcanic arcs (Tithonian–Berriasian), 4 – terrigenous (volcanomictic) and carbonate-terrigenous complexes of marginal and residual basins (Berriasian–Hauterivian); 5, 6 – stratified structural-material complexes of the outer zone of the Okhotsk-Chukotka volcanic-plutonic belt (OCVP): 5 – terrigenous complex of “pre-volcanogenic” molasse with basalts, 6 – basaltic complex (Salamikha formation); 7–9 – Nembonda volcanic trough, Cretaceous volcanogenic complexes of the OCVP (Aptian–Cenomanian (?)): 7 – andesite-basalt complex (Ilguveem sequence), 8 – rhyolite-dacite complex (Dirguveem sequence), 9 – basalt-andesite complex (Teleneut sequence); 10, 11 – AOSS plutonic complexes (identified for the first time): 10 – Keyetty gabbro-granodiorite-granite complex, 11 – Tryokhglavy gabbro-monzonite-granodiorite-granite complex; 12–15 – OCVP plutonic complexes: Early Cretaceous Oloy (?) gabbro-granodiorite-granite complex (12) and Yablon granite-granodiorite complex (13), Late Cretaceous Vorontsov quartz monzonites – moderately alkaline granites (14), subvolcanic dacites and rhyolites (15); 16 – sampling points for U–Pb zircon dating (numbers mean age, Myr; for serial numbers, see Table 3); 17 – research area; 18, 19 – tectonic dislocations: 18 – main (circled numbers): Aluchin (1), Krestovskiy-Salamikha (2), Oloy-Beryozovka (3), 19 – minor; 20, 21 – geological boundaries: 20 – stratigraphic concordances and intrusive formations, 21 – stratigraphic unconformities; 22 – numbered studied massifs (numbers in squares): 1 – Tryokhglavy, 2 – Rzhavyy, 3 – Vukvaam, 4 – Upper-Keyetty, 5 – Middle-Keyetty, 6 – Ireveem, 7 – Lower-Keyetty; 23 – distinguished areas: A – Keyetty, B – Tryokhglavy.

* По настоянию авторов сохраняется дефисное написание названий массивов вопреки общему правилу (прим. ред.).

расположенные соответственно в пределах Вукваамской и Ильгувеевской СФЗ Олойской зоны (Решения..., 2009; Старикова, Гагиева и др., 2023).

Участок Трехглавый расположен в верховьях р. Алучин, сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями *глуховской* и *прозрачинской* свит (титон – большая часть берриаса). В их строении преобладают разнотермные туфы риолитового, риодацитового, дацитового, реже андезитового состава; туфопесчаники, вулканомиктовые песчаники и алевролиты, переслаивающиеся с туфами, имеют подчиненное распространение (Старикова, Гагиева и др., 2023; Старикова, Коновалов и др., 2023). Толщи характеризуются моноклинальным залеганием, их общая мощность составляет более 1100 м. Вулканогенные образования интродуцированы массивами яблонского комплекса, среди которых вычленены Ржавый, Вукваамский и Трех-

главый штоки площадью от 15–60 до 135 км². В строении данных штоков установлено до трех фаз внедрения – габбро, габбродиориты первой фазы, кварцевые диориты, гранодиориты и монцититы второй фазы и граниты, гранит-порфиры третьей фазы. Отмечается значительная доля умеренно-щелочных разновидностей пород; так, в строении Трехглавого штока они составляют около 10 % площади (Копытов, 1981). Обозначенные массивы имеют сложные очертания; характеризуются извилистыми контактовыми зонами с частично тектоническими прямолинейными границами. Величина эрозионного среза незначительная, местами сохраняются останцы кровли.

Участок Кейэттынский расположен в бассейне одноименного правого притока р. Олой; представлен вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями *уконской* и *эломской* толщ (кимеридж – средний титон) и нерасчлененных *корваваамской* и *оляканской* толщ (верх-

Таблица 1. Химический состав интрузивных пород восточной части Олойской зоны

Table 1. Chemical composition of intrusive rocks in the eastern part of the Oloy zone

участок Трехглавый (трехглавый комплекс)									
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Порода	v	v	δ	μ	μ	γδ	γδ	γ	γ
№ пробы	3258/1	3260/1	3256/2	4220/1	3253/1	4221/1	3262/1	3255/1	3250/1
петрогенные элементы, масс. %									
SiO ₂	45.60	49.50	57.20	60.20	62.70	69.10	69.10	70.80	71.00
TiO ₂	1.63	0.87	0.54	0.53	0.61	0.38	0.48	0.37	0.41
Al ₂ O ₃	16.60	20.00	18.00	16.90	15.90	15.10	14.80	14.50	14.20
Fe ₂ O ₃ расч	7.50	5.58	3.61	3.34	2.63	1.64	1.86	1.41	1.63
FeO	6.31	3.90	3.25	1.87	2.30	1.09	1.27	1.05	1.17
MnO	0.24	0.18	0.10	0.11	0.09	0.02	0.06	0.04	0.08
MgO	6.20	4.23	3.98	2.53	2.38	1.70	1.18	1.29	1.09
CaO	10.80	9.70	7.36	5.65	4.47	2.34	2.96	2.72	2.22
Na ₂ O	2.29	3.13	2.94	4.38	4.38	3.92	3.78	3.80	4.38
K ₂ O	0.70	0.84	1.41	2.37	2.49	3.10	3.04	3.16	2.66
P ₂ O ₅	0.18	0.10	0.17	0.17	0.15	0.09	0.08	0.06	0.08
ППП	1.33	0.99	1.04	0.71	1.01	1.17	0.65	0.45	0.76
Сумма	100.00	99.40	100.00	99.00	99.30	99.80	99.30	99.80	99.80
примесные элементы, г/т									
La	3.83	4.44	6.43	8.33	15.50	9.59	9.73	16.50	16.30
Ce	9.34	9.78	15.00	17.10	32.00	20.20	21.20	35.70	33.30
Pr	1.49	1.48	2.14	2.29	4.17	2.60	3.14	4.35	4.09
Nd	7.98	7.23	7.83	9.77	16.60	10.40	12.60	17.20	15.90
Sm	2.40	1.75	1.53	1.86	3.50	2.06	2.92	3.00	3.19
Eu	0.88	0.76	0.64	0.74	0.99	0.66	0.74	0.63	0.79
Gd	2.65	1.85	1.37	1.79	3.17	1.58	2.89	2.65	3.32
Tb	0.39	0.25	0.19	0.27	0.49	0.24	0.42	0.38	0.51
Dy	2.62	1.87	1.12	1.40	2.91	1.37	2.76	2.12	3.27
Ho	0.52	0.42	0.25	0.30	0.56	0.28	0.63	0.46	0.72
Er	1.50	1.09	0.71	0.84	1.71	0.84	1.64	1.27	2.24
Tm	0.20	0.17	0.13	0.14	0.28	0.14	0.30	0.22	0.35
Yb	1.40	1.09	0.87	0.87	1.83	0.96	2.08	1.49	2.58
Lu	0.19	0.18	0.13	0.16	0.27	0.15	0.32	0.25	0.36
Rb	19.70	13.20	19.00	30.40	42.40	47.90	49.00	57.70	46.80
Sr	599	668	676	747	687	660	285	403	269
Y	13.60	9.89	6.97	8.07	16.70	8.35	17.00	12.90	21.10
Zr	41.80	38.00	124	82.70	155	142	194	160	181
Nb	1.30	1.28	1.91	2.14	4.22	3.12	3.09	3.04	4.27
Ba	153	176	241	640	737	882	465	614	631
Hf	1.22	1.10	3.05	2.41	3.90	4.04	5.18	4.83	5.00
Ta	0.10	0.10	0.10	0.10	0.28	0.17	0.27	0.27	0.33
Th	0.47	0.59	1.59	1.30	2.60	2.13	3.12	4.06	3.24
U	0.30	0.37	0.86	0.64	1.03	0.79	1.91	1.82	1.42

Окончание табл. 1

участок Кейэттынский (кейэттынский комплекс)										
№ п/п	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Порода	vδ	vδ	δ	δ	qδ	γδ	γ	ly	ly	ly
№ пробы	3164/1	3190/1	4095	4159/1	3114	3112	3188/1	3178/1	3126/1	3128/1
петрогенные элементы, масс. %										
SiO ₂	51.20	52.50	57.50	57.60	63.00	67.00	71.80	75.80	76.50	76.90
TiO ₂	1.03	1.06	1.10	0.80	0.73	0.51	0.49	0.04	0.36	0.25
Al ₂ O ₃	18.50	17.30	17.50	16.00	16.10	15.90	14.70	12.20	13.00	12.10
Fe ₂ O ₃ расч	3.39	4.04	4.26	3.64	1.71	1.39	1.11	0.58	0.37	0.60
FeO	5.06	5.18	3.40	4.60	3.11	2.29	1.29	0.37	0.37	0.96
MnO	0.14	0.19	0.20	0.17	0.09	0.07	0.12	0.01	0.01	0.01
MgO	5.24	5.38	2.55	5.20	2.43	1.57	1.34	0.24	0.64	0.81
CaO	9.25	8.85	6.92	6.56	4.68	3.12	1.86	0.34	1.83	1.00
Na ₂ O	2.92	2.81	4.66	2.94	3.98	3.72	5.79	3.22	6.08	5.89
K ₂ O	0.73	0.20	0.45	0.27	2.78	3.40	0.37	5.71	0.31	0.46
P ₂ O ₅	0.20	0.15	0.24	0.10	0.15	0.12	0.08	0.05	0.05	0.05
ППП	1.22	1.72	0.66	1.61	0.56	0.71	0.87	0.43	0.49	0.66
Сумма	99.50	99.90	99.90	100.00	99.70	100.00	100.00	99.1.	100.00	99.80
примесные элементы, г/т										
La	5.32	7.08	7.16	8.20	18.60	16.00	12.50	17.50	17.90	21.70
Ce	11.50	17.50	17.80	18.70	38.90	32.60	39.00	27.20	39.50	46.60
Pr	1.68	2.59	2.88	2.54	4.87	4.12	5.83	3.16	5.55	6.39
Nd	6.97	12.30	13.70	11.80	20.00	14.90	24.70	8.82	23.30	27.00
Sm	1.54	3.53	3.96	3.09	4.12	2.86	6.10	1.34	5.18	6.56
Eu	0.51	1.14	1.38	0.99	1.02	0.76	1.15	0.10	0.96	0.79
Gd	1.75	3.63	4.83	3.49	3.87	2.62	5.46	1.24	5.55	6.66
Tb	0.27	0.61	0.77	0.59	0.65	0.50	0.93	0.19	0.94	1.16
Dy	1.44	4.04	5.01	4.00	3.69	2.85	5.94	1.04	6.62	7.61
Ho	0.31	0.84	1.03	0.85	0.76	0.60	1.26	0.24	1.36	1.55
Er	0.89	2.54	2.87	2.44	2.47	1.71	3.87	0.62	3.95	4.71
Tm	0.13	0.37	0.42	0.38	0.35	0.28	0.60	0.13	0.66	0.74
Yb	0.85	2.35	2.77	2.61	2.37	2.01	3.83	1.02	4.35	5.01
Lu	0.13	0.34	0.46	0.39	0.37	0.33	0.58	0.17	0.76	0.78
Rb	6.40	2.34	4.14	2.15	67.80	77.40	6.14	66.00	4.21	6.32
Sr	358	446	426	352	391	305	166	37.60	152	103
Y	9.23	22.90	28.70	23.30	22.50	16.70	36.00	8.44	40.50	49.50
Zr	42.40	85.90	73.40	120	189	151	249	43.70	247	207
Nb	1.75	2.91	2.26	3.66	6.51	4.29	6.63	2.73	5.54	5.43
Ba	125	131	160	174	484	565	105	38.30	115	97.50
Hf	1.12	2.47	2.41	3.41	5.32	4.12	6.47	1.42	6.96	6.94
Ta	0.10	0.12	0.11	0.26	0.48	0.34	0.42	0.34	0.37	0.39
Th	0.77	0.74	0.62	0.68	5.45	5.04	2.67	7.08	4.34	5.22
U	0.35	0.32	0.26	0.31	1.72	1.88	0.98	2.07	1.73	2.14

Примечание: vδ – габбродиорит, δ – диорит, qδ – кварцевый диорит, γδ – гранодиорит, ly – лейкогранит. Номера проб для участков: *Трехглавый* – массивы Трехглавый (3255/1, 3260/1, 3256/2, 3262/1), Ржавый (4220/1, 4221/1), Вукваамский (3250/1, 3253/1); *Кейэттынский* – массивы Верхне-Кейэттынский (3112), Средне-Кейэттынский (3114, 3178/1), Ирээвеемский (3126/1, 3128/1, 4095), Нижне-Кейэттынский (3164/1, 3190/1, 4159/1, 3188/1). Содержания петрогенных элементов пересчитаны на безводную основу. Анализ выполнен – ЦЛ ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург; аналитики: В. А. Шишлов, В. Л. Кудряшов, В. Н. Кириллов.

ний титон – нижний берриас); общая видимая мощность толщ более 1120 м (Старикова, Гагиева и др., 2023). Здесь нижняя часть разреза сложена трахиандезитами, трахиандеибазальтами, андезибазальтами и базальтами (с небольшой долей туфов) уконской толщи (кимеридж), сменяющихся туфами кислого и среднего состава, которым подчинены лавы риодацитов, трахириодацитов, дацитов, трахидацитов, трахириолитов, реже дациандезитов, андезитов, трахиандезитов, андезибазальтов, базальтов эломской толщи (средний титон). Выше залегают корваваамская и оляканская нерасчлененные толщи, в строении которых преобладают туффиты, туфопесчаники, туфогравелиты и вулканомиктовые песчаники. В соседней Умкувеемской СФЗ данный вулканогенный разрез наращивается (от верхнего берриасса до нижнего готерива(?)) преимуще-

ственно терригенными вулканомиктовыми породами с пластами известняков и алевролитов, для которых устанавливаются относительно спокойные прибрежно-морские условия образования в остаточных бассейнах (Старикова, Гагиева и др., 2023). Здесь интрузивные образования, прорывающие вулканогенные толщи, отнесены к олойскому комплексу; среди них выделены в доальбскую группу Верхне-, Средне-, Нижне-Кейэттынский и Ирээвеемский штоки. Данные интрузии обладают эллипсовидной формой (протягиваясь от 1–2 до 15 км); нередко вытянуты по длинной оси вдоль тектонических нарушений, приобретая облик трещинных интрузивов. В их составе преобладают порфировидные разновидности гранодиоритов, кварцевых диоритов, диоритов, которые прорывают небольшие тела гранитов. Ближе к периферии гранитоиды сменяются габбро и габ-

бродиоритами. В строении массивов установлено до трех фаз; их выделение и взаимоотношение основывается на находках ксенолитов габброидиоритов (первой фазы) в гранодиоритах и гранитах (второй и третьей фаз), а также по появлению поздних даек гранитов и гранит-порфиров среди габброидиоритов и гранодиоритов. Особенности состава выделяется Ирээвемский шток, полностью сложенный гранитами, которые интенсивно альбитизированы и по химическому составу соответствуют лейкократовым высоконариевым разностям (табл. 1; рис. 3а, б).

Размещение интрузивных тел Кейэттынского участка контролируется региональными разло-

мами субширотного и северо-западного простирания, которые отражаются в геофизических полях линейным градиентным электромагнитным полем.

ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТРУЗИВНЫХ ПОРОД

Участок Трехглавый включает интрузивные тела, состав которых представлен широким рядом от умереннокалиевых габбро до высококалиевых лейкогранитов нормально-щелочного ряда (табл. 1; рис. 3а, б). Преобладают умеренноглиноземистые разности с трендом к высокоглино-

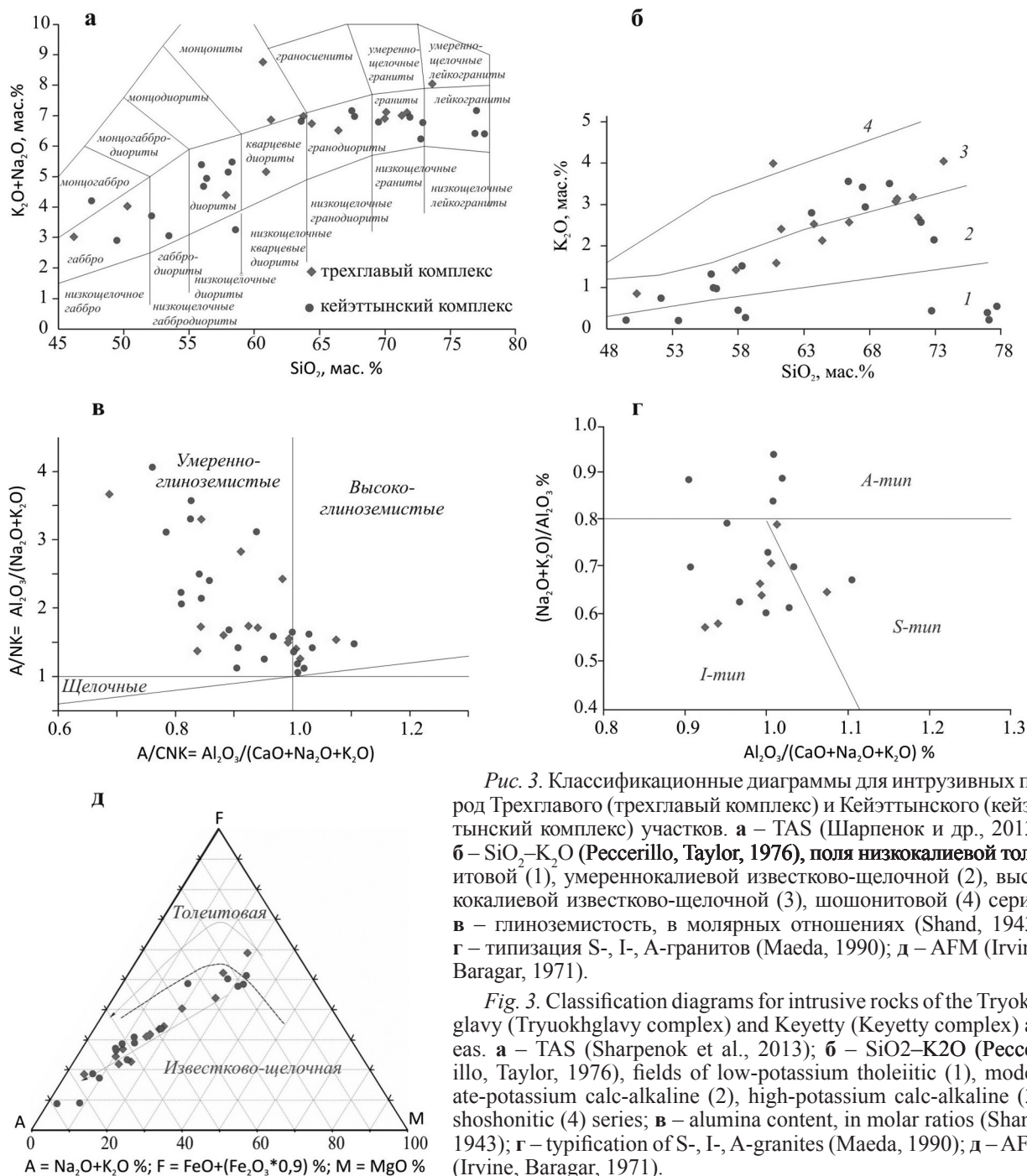


Рис. 3. Классификационные диаграммы для интрузивных пород Трехглавого (трехглавый комплекс) и Кейэттынского (кейэттынский комплекс) участков. а – TAS (Шарпенко и др., 2013); б – SiO_2 - K_2O (Peccherillo, Taylor, 1976), поля низкокалиевой толейтовой (1), умереннокалиевой известково-щелочной (2), высококалиевой известково-щелочной (3), шошонитовой (4) серий; в – глиноземистость, в молярных отношениях (Shand, 1943); г – типизация S-, I-, A-гранитов (Maeda, 1990); д – AFM (Irvine, Baragar, 1971).

Fig. 3. Classification diagrams for intrusive rocks of the Tryokhglavy (Tryuokhglavy complex) and Keyetty (Keyetty complex) areas. а – TAS (Sharpenok et al., 2013); б – SiO_2 - K_2O (Peccherillo, Taylor, 1976), fields of low-potassium tholeiitic (1), moderate-potassium calc-alkaline (2), high-potassium calc-alkaline (3), shoshonitic (4) series; в – alumina content, in molar ratios (Shand, 1943); г – typification of S-, I-, A-granites (Maeda, 1990); д – AFM (Irvine, Baragar, 1971).

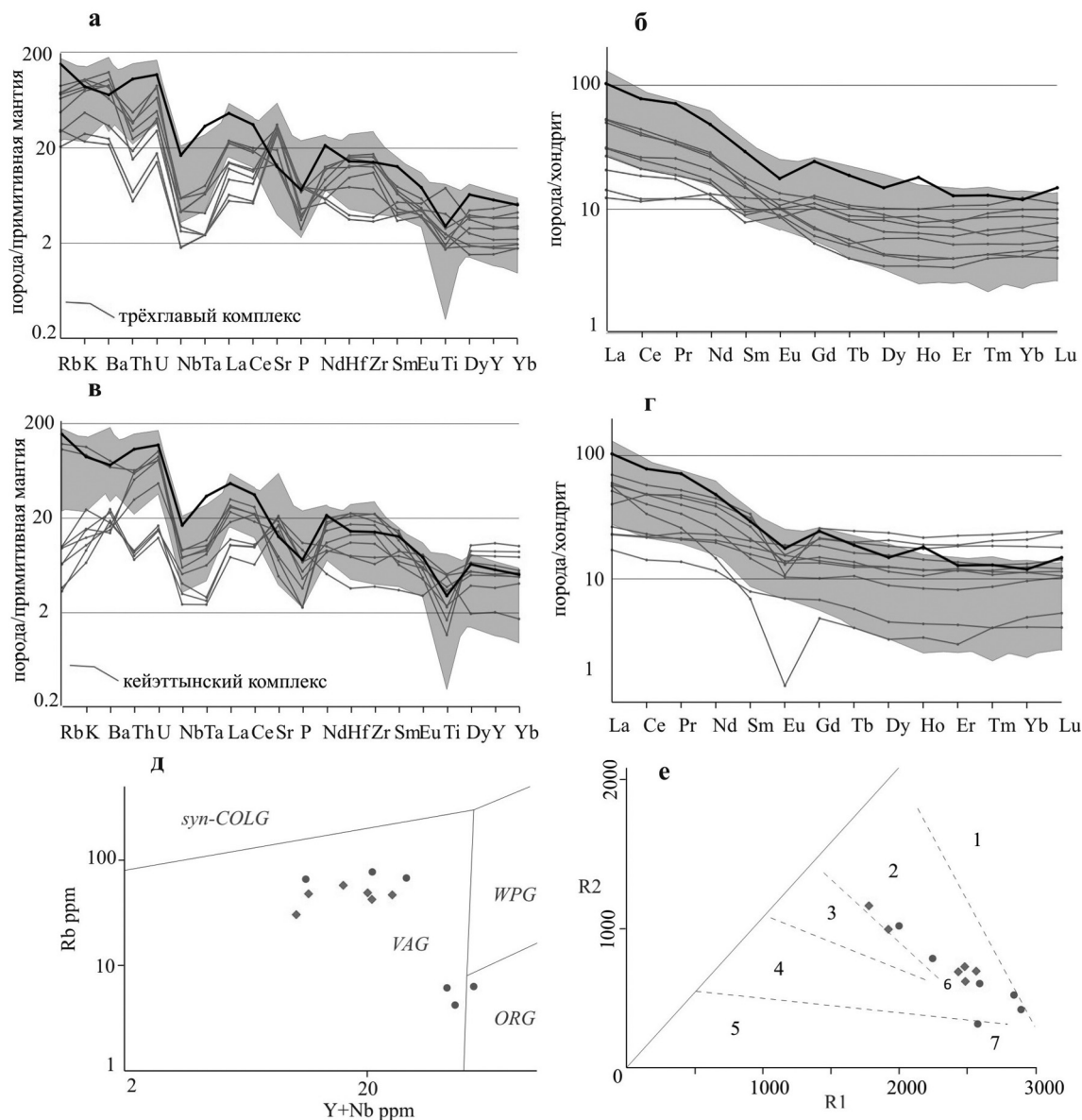


Рис. 4. Диаграммы распределения петрогенных и примесных элементов для интрузивных пород Трёхглавого (трёхглавый комплекс) и Кейэттынского (кейэттынский комплекс) участков. Спектры распределения элементов-примесей, нормированные по составу: **а, в** – примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989), **б, г** – углеродистого хондрита C1 (Boynnton, 1984). Область серого цвета – интервал сводных данных по составу гранитоидов яблонского и воронцовского комплексов (альб-сантон) ОЧВП, см. (Старикова, Коновалов и др., 2023); черная линия – средние содержания химических элементов в верхней части континентальной коры, см. (Григорьев, 2009). Дискриминационные диаграммы (условные на рис. 3а): **д** – Rb–Y+Nb (Pearce et al., 1984). VAG – граниты вулканических дуг, syn-COLG – коллизионные граниты, WPG – внутриплитные граниты, ORG – граниты океанических хребтов; **е** – R1–R2 (Batchelor, Bowden, 1985). R1 = $4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$; R2 = $6Ca + 2Mg + Al$; 1 – гранитоидные продукты мантийного фракционирования, 2 – доколлизийные (надсубдукционные) гранитоиды, 3 – гранитоиды постколлизийных поднятий, 4 – позднеорогенные гранитоиды, 5 – посторогенные гранитоиды, 6 – синколлизийные гранитоиды, 7 – постколлизийные гранитоиды.

Fig. 4. Diagrams of the major and trace elements distribution for the intrusive rocks of the Tryokhglavy (Tryokhglavy complex) and Keyetty (Keyetty complex) areas. Distribution spectra of trace elements normalized by composition: **а, в** – primitive mantle (Sun, McDonough, 1989), **б, г** – carboniferous chondrite C1 (Boynnton, 1984). The grey area is the interval of summary data by the composition of granitoids of the OCHVP Yablonsky and Vorontsovsky complexes (Albian–Santonian), see (Starikova, Konovalov et al., 2023); black line, average contents of chemical elements in the upper part of the continental crust, see (Grigoriev, 2009). Discrimination diagrams (conventional in Fig. 3a): **д** – Rb–Y+Nb (Pearce et al., 1984). VAG – volcanic arc granites, syn-COLG – collision granites, WPG – intra-plate granites, ORG – oceanic ridge granites; **е** – R1–R2 (Batchelor, Bowden, 1985). R1 = $4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$; R2 = $6Ca + 2Mg + Al$; 1 – granitoid products of mantle fractionation, 2 – pre-collisional (supra-subduction) granitoids, 3 – granitoids of post-collisional uplifts, 4 – late orogenic granitoids, 5 – post-orogenic granitoids, 6 – syncollisional granitoids, 7 – post-collisional granitoids.

земистым по мере насыщения оксидами щелочей и кальция (рис. 3в).

На диаграмме Маеда (Maeda, 1990) большинство фигуративных точек составов пород сосредоточено в поле гранитов I-типа (рис. 3г). Точки составов на диаграмме AFM (Irvine, Baragar, 1971) распределены согласно боуэнскому тренду дифференциации, характерному для магматических образований известково-щелочной серии (рис. 3д).

Изученным породам свойственны повышенные содержания крупноионных литофильных катионов (LILE): Rb, K, Ba, Sr, и умеренные концентрации высокочargedных (HFSE): Zr, La, Hf, Nd, Sm, Eu (табл. 1; рис. 4а). На диаграммах распределения нормированных спектров микроэлементов отчетливо выражен Ta–Nb минимум и отрицательная аномалия Р. В целом распределение элементов-примесей в породах трехглавого комплекса показывает пониженные содержания относительно графика среднего состава верхней коры, а в части LILE – составов альб-сантонских гранитоидов олойского и яблонского комплексов ОЧВП.

Концентрации редкоземельных элементов (REE) характеризуются обогащением легких элементов (LREE) по отношению к тяжелым (HREE) (табл. 1; рис. 4б); данное отражено отношением $La_N/Yb_N = 4.64$. Значения суммы содержаний редкоземельных элементов (ΣREE) варьируют от 36 до 87 г/т. Европиевая аномалия проявлена слабо, незначительно отмечается только в гранитах. В сравнении с графиком среднего состава верхней коры породы трехглавого комплекса характеризуются пониженными содержаниями REE; по отношению к составам раннемеловых гранитоидов ОЧВП низкие содержания REE устанавливаются только в области LREE.

На дискриминационных диаграммах Дж. Пирса (Pearce et al., 1984) и Бетчела и Боудена (Batchelor, Bowden, 1985) точки составов интрузивных пород участка Трехглавый располагаются: в первом случае в области островных и континентальных дуг, во втором – формируют тренд из области доколлизийных (надсубдукционных) гранитоидов к синколлизийным (рис. 4д, е).

Участок Кейэтитынский объединяет массивы, представленные габбро, габбродиоритами, диоритами, кварцевыми диоритами, гранодиоритами, гранитами и лейкогранитами (табл. 1, рис. 3а). В отличие от участка Трехглавого здесь в строении интрузивных тел отмечаются низкокальциевые (альбитизированные) породы основного и кислого состава (рис. 3б). В целом среди пород участка преобладают умеренноглиноземистые разности, при этом граниты выделяются повышенными содержаниями глинозема (рис. 3в). На диаграмме Маеда (Maeda, 1990) точки составов гранитов в равной степени распределены в полях I- и A-типов (рис. 3г). На диаграмме AFM (Irvine, Baragar, 1971) расположение точек составов кейэтитынских гранитоидов аналогично таковому для Трехглавого участка (рис. 3д).

Содержания примесных элементов в породах Кейэтитынского участка в целом схожи с Трехглавым (рис. 4в, г); здесь также отмечается Ta–Nb минимум и отрицательная аномалия Р. К отличительным характеристикам гранитоидов Кейэтитынского участка можно отнести следующие: пониженные значения содержаний LILE – Rb, K, Ba, Sr; ярко выраженная европиевая аномалия, проявленная только для лейкократовых альбитизированных гранитов; относительно повышенные концентрации редкоземельных элементов ($\Sigma REE = 33–137$ г/т) при общем пологом спектре распределения (за счет повышенных содержаний HREE в гранитах и лейкогранитах Ирээвеевского и Нижне-Кейэтитынского массивов).

Наиболее ярко различия в химическом составе пород Трехглавого и Кейэтитынского участков проявились в показателе отношения La_N/Yb_N ; так,

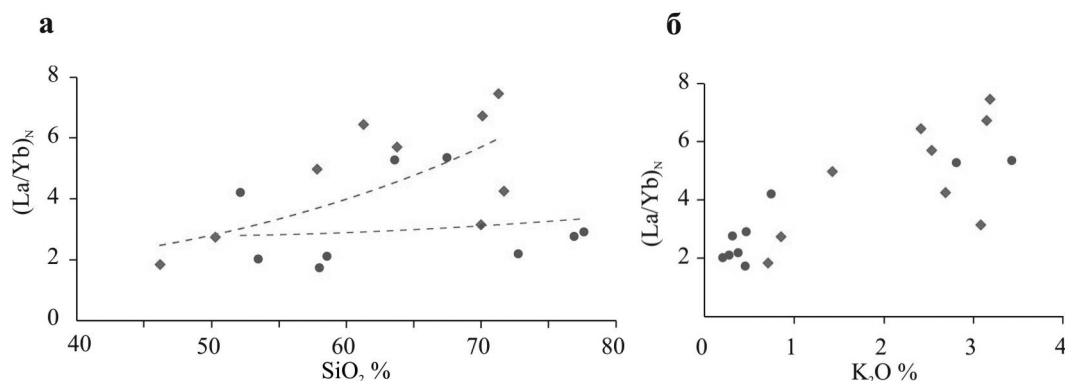


Рис. 5. Диаграммы зависимости величины $(La/Yb)_N$ от содержаний кремнезема (а) и оксида калия (б). Условные на рис. 3а.

Fig. 5. Diagrams of the value $(La/Yb)_N$ dependence on the contents of silica (a) and potassium oxide (b). Conditional in Fig. 3a.

для кейэтитыньских гранитоидов отмечается относительно пониженное содержание LREE ($(La/Yb)_N = 3.27$). На диаграмме зависимости величины $(La/Yb)_N$ от содержаний кремнезема (рис. 5а) для пород трехглавого комплекса наблюдается тренд возрастания величины La_N/Yb_N (более чем в 2 раза) в направлении от пород основного состава к кислым, тогда как в породах кейэтитыньского комплекса данный показатель существенно не меняется.

На диаграмме, характеризующей зависимость величины $(La/Yb)_N$ от содержания оксида калия (рис. 5б), большинство точек состава пород кейэтитыньского комплекса группируется в области низкокалиевых пород с пониженными содержаниями LREE; в породах трехглавого комплекса по мере увеличения калиевости наблюдается обогащение легкими REE (значение $(La/Yb)_N$ возрастает от 2 до 8).

ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТРУЗИВНЫХ ПОРОД

Участок Трехглавый. Изотопное U–Pb (SHRIMP-II) датирование циркона выполнено для пород Трехглавого, Вукваамского и Ржавого массивов (рис. 6, табл. 2, 3). Анализируемые цирконы прозрачные, желтого цвета или бесцветные; представлены идиоморфными кристаллами призматического облика, реже их обломками. Большинство цирконов в катодолюминесцентном свете с умеренным и ярким свечением обладают тонкой осцилляционной и секториальной зональностью как центральных, так и краевых частей. Во всех исследуемых образцах (за исключением пробы 3253/1) получены конкордантные значения возраста.

Для гранитов Трехглавого массива (проба 3255/1) изотопная датировка составила 141 ± 2 млн л.* (рис. 6г). Близкие значения возраста установлены для цирконов из гранита Вукваамского массива (проба 3250/1) – 141 ± 2 млн л. (рис. 6в). Изотопный анализ кварцевого диорита того же массива (обр. 3253/1) показал присутствие в цирконах нерадиогенного свинца. Для данной пробы расчет возраста производился по отношению $^{206}Pb/^{238}U$, не скорректированным на ^{204}Pb , вследствие чего эллипсы погрешностей единичных анализов располагаются над линией конкордии. Изотопный возраст рассчитан по линии смещения (хорде), которая фиксируется в точке состава обыкновенного свинца, и составил 142 ± 2 млн л. (рис. 6б). Полученные датировки (с учетом погрешности) согласуются с геохронологическими и биостратиграфическими данными о нижнеберриассовом возрасте вмещающих вулканитов глуховской (граница титонского и берриасского ярусов, по материалам U–Pb датирования – 140 ± 2 млн л.) и прозраченской (нижний

берриас, по определениям остатков фауны и флоры) свит (Старикова, Гагиева и др., 2023). Для массива Ржавый результаты датирования по циркону из гранодиорита (обр. 4221/1) показали значение возраста 138 ± 2 млн л. (рис. 6а).

Участок Кейэтитыньский. Изотопное датирование выполнено по гранитоидам Верхне-, Средне-, Нижне-Кейэтитыньского и Ирээвеемского массивов (рис. 7; табл. 2, 4). Анализируемые цирконы представлены прозрачными желтыми и бесцветными кристаллами призматического облика с магматической зональностью (в длиннопризматических кристаллах наблюдаемая как полосчатая и секториальная).

Для Верхне-Кейэтитыньского массива по цирконам из гранодиорита (проба 3112) получено конкордантное значение возраста 140 ± 1.5 млн л. (рис. 7в). Датирование Средне-Кейэтитыньского массива, выполненное по цирконам из кварцевого диорита (проба 3114), показало конкордантное значение возраста 142 ± 1 млн л. (рис. 7г). Для Нижне-Кейэтитыньского массива по цирконам из диорита (проба 4159/1) получен средневзвешенный возраст с коррекцией по Pb^{207} – 144.8 ± 1.4 или конкордантный – 145 ± 1.5 млн л. (рис. 7б). Наиболее древняя датировка установлена по цирконам из альбитизированного лейкократового гранита Ирээвеемского массива (проба 3126/1) – 147.5 ± 1.5 млн л. (рис. 7а); полученное значение возраста совпадает с результатами датирования Верхне-Кейэтитыньского массива, приводимыми в материалах Т. В. Кары с соавторами (2019), – 147.7 ± 2.5 млн л. Данная датировка оказывается древнее наших данных по Верхне-Кейэтитыньскому массиву и совпадает с возрастом вмещающих позднеюрских вулканитов эломской толщи – 146.5 ± 2.0 млн л. по материалам U–Pb датирования (Старикова, Гагиева и др., 2023). Можно предположить, что в расчет возраста Ирээвеемского и Верхне-Кейэтитыньского массивов (147.5 ± 1.5 и 147.7 ± 2.5 млн л. соответственно) могли попасть цирконы, захваченные из вмещающих вулканитов эломской толщи.

Для определения источников вещества раннемелового магматизма Олойской зоны было проведено исследование Nd и Sr изотопных систем в гранодиоритах Верхне-Кейэтитыньского массива (проба 3112) и яблонского комплекса ОЧВП (проба 4181/1).

Полученные результаты измерений Sm и Nd, Rb и Sr изотопных систем гранодиоритов Верхне-Кейэтитыньского массива показывают низкие (близкие к мантийным) первичные отношения изотопов $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512744$ и $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.703579$ (табл. 5). От них существенно отличаются гранодиориты яблонского комплекса ОЧВП, которые характеризуются более высокими значениями отношения изотопов $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512945$ и пониженными изотопов $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.703044$, близкими к мантийным.

*Здесь и далее жирным шрифтом выделены новейшие результаты датирования, полученные авторами.

На диаграмме в координатах $^{143}/^{144}\text{Nd}$ – $^{87}/^{86}\text{Sr}$ (Zindler, Hart, 1985) точки значений изотопных отношений Верхне-Кейэтынского массива и яблонского комплекса располагаются в пределах главной мантийной последовательности (рис. 8). При этом для гранодиоритов Верхне-

Кейэтынского массива отмечается незначительное смещение фигуративной точки в сторону обогащенного мантийного источника – аналога нижнекорового вещества (ЕМ1), тогда как гранодиориты яблонского комплекса попадают в область обогащенной (U + Th/Pb) мантии (HIMU).

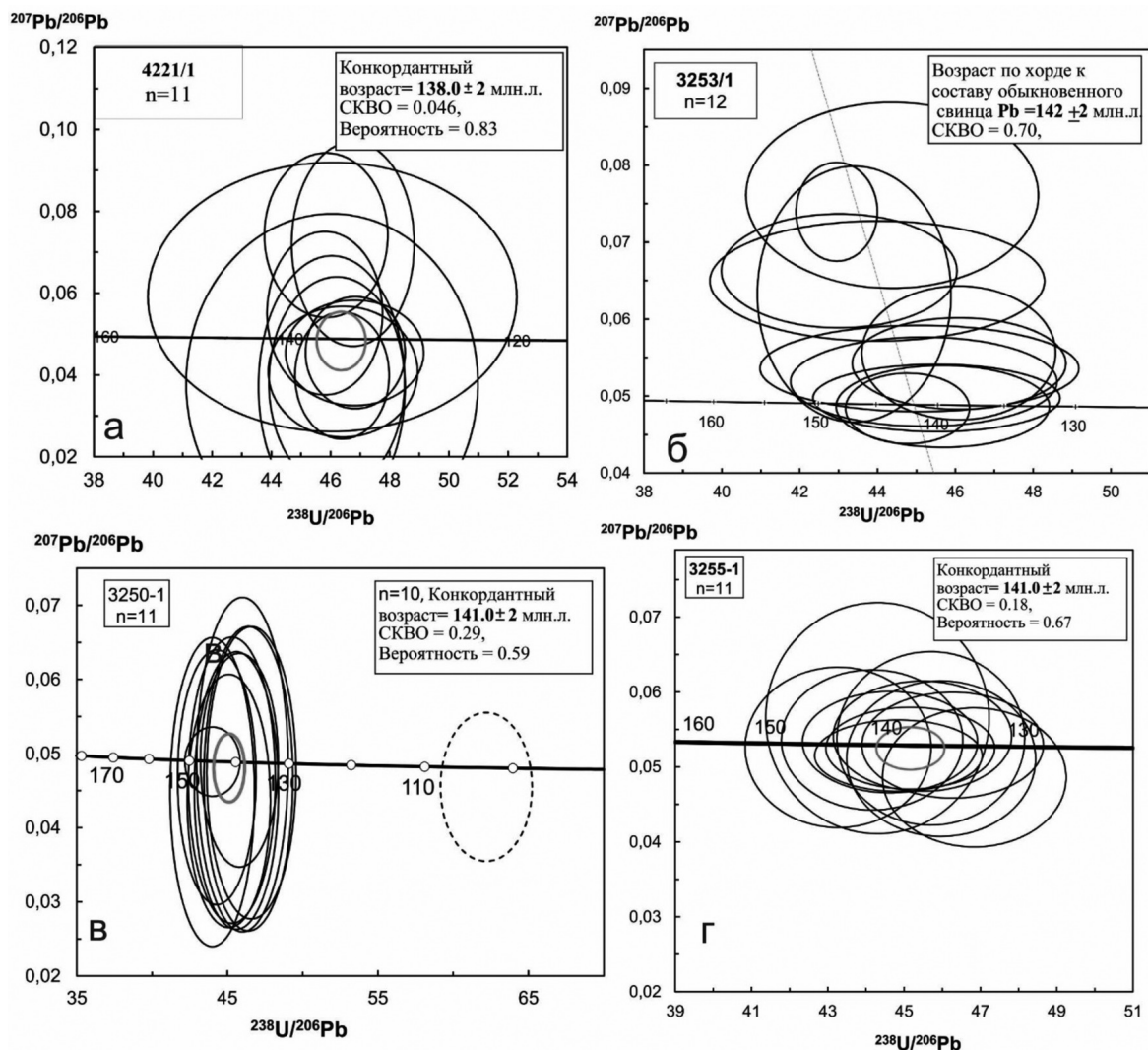


Рис. 6. Результаты U–Pb (SHRIMP-II) датирования циркона из гранитоидных массивов участка Трехглавый: а – массив Ржавый, гранодиорит; б – массив Вукваамский, кварцевый диорит; в – массив Вукваамский, гранит; г – массив Трехглавый, гранит. Эллипсы показывают изотопные отношения в индивидуальных кристаллах циркона, с учетом погрешности; пунктиром – эллипс для точечного анализа, не включенного в расчет возраста образца.

Fig. 6. Results of U–Pb (SHRIMP-II) dating of zircon from granitoid massifs of the Tryokhglavy site: а – Rzhavyy massif, granodiorite; б – Vukvaam massif, quartz diorite; в – Vukvaam massif, granite; г – Tryokhglavy massif, granite. Ellipses show isotope ratios in individual zircon crystals, error considered; dotted line – ellipse for point analysis not included in the sample age calculation.

Рис. 7. Результаты U–Pb (SHRIMP-II) датирования циркона из гранитоидных массивов участка Кейэтынский: а – массив Ирвеемский, альбитизированный лейкократовый гранит; б – массив Средне-Кейэтынский, кварцевый диорит; в – массив Верхне-Кейэтынский, гранодиорит; г – массив Нижне-Кейэтынский, диорит. Эллипсы показывают изотопные отношения в индивидуальных кристаллах циркона, с учетом погрешности

Fig. 7. Results of U–Pb (SHRIMP-II) dating of zircon from the Keyetty site granitoid massifs: а – Ireveyem massif, albitized leucocratic granite; б – Middle-Keyetty massif, quartz diorite; в – Upper-Keyetty massif, granodiorite; г – Lower-Keyetty massif, diorite. Ellipses show isotope ratios in individual zircon crystals, error considered.

Таблица 2. Результаты U–Pb датирования цирконов из магматических пород Трехглавого и Кейэттынского участков

Table 2. Results of U–Pb dating of zircons from igneous rocks of the Tryokhglavy and Keyetty areas

№ п/п	№ пробы	Порода	Возраст U–Pb по циркону; млн л.	Координаты точки опробования		Массив, толща/свита; привязка
				Y (с. ш.)	X (в. д.)	
Участок Трехглавый						
1	3255/1	Гранит	141 ± 2	65° 56' 58.6"	165° 34' 43.2"	Трехглавый; руч. Большой
2	4221/1	Гранодиорит	138 ± 2	65° 59' 25.3"	165° 44' 17.2"	Ржавый; верх. р. Алучин
3	3250/1	Гранит	141 ± 2	65° 56' 38.5"	165° 44' 38.8"	Вукваамский; руч. Рыжий
4	3253/1	Кварцевый диорит	142 ± 2	65° 56' 29.6"	165° 47' 21.5"	Вукваамский; руч. Рыжий
5	5320/6*	Туф дацита	140 ± 2	65° 57' 12.2"	165° 45' 46"	глуховская свита; руч. Сабля-Рыжий
Участок Кейэттынский						
6	3112	Гранодиорит	140 ± 1.5	65° 34' 54.7"	164° 16' 51.4"	Верхне-Кейэттынский; р. Кейэттыне
7	33/31**	Гранодиорит	147.5 ± 2.5	65° 34' 43"	164° 16' 58"	
8	3114	Гранодиорит	141.5 ± 1	65° 32' 48.6"	164° 10' 7.8"	Средне-Кейэттынский; р. Кейэттыне
9	3119*	Туф риодацита	146.5 ± 2	65° 32' 57.2"	164° 8' 40.1"	эломская толща; р. Кейэттыне
10	3126/1	Гранит лейкокра- товый	147.5 ± 1.5	65° 28' 19.3"	164° 3' 9.5"	Ирзвеевский; р. Кейэттыне
11	4159/1	Диорит	145 ± 1.5	65° 26' 18.8"	164° 10' 34.9"	Нижне-Кейэттынский; р. Кейэттыне

Примечание. * – Старикова, Гагиева и др. (2023); ** – Кара и др. (2019). Порядковый номер – точка отбора пробы на рис. 2.

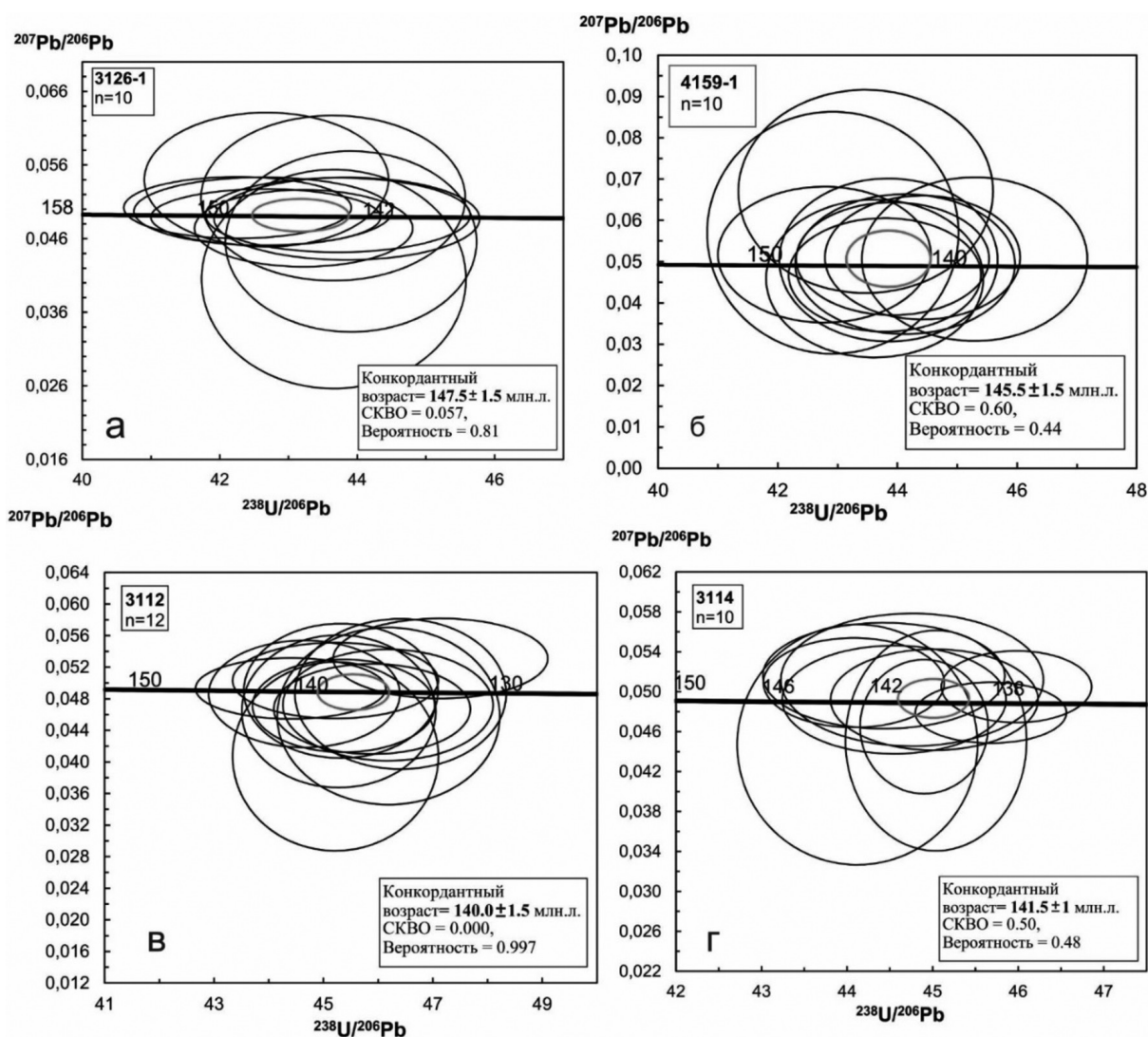


Таблица 3. Изотопные характеристики циркона из гранитоидов участка Трехглавый

Table 3. Isotopic characteristics of zircon from the Tryokhglavy site granitoids

№ пробы и точки измерения	²⁰⁶ Pbс%	U, г/т	Th, г/т	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*, г/т	(1) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U возраст	±%	Total ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±%	(1) ²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	±%	err corr
4221/1_1.1	2.55	87	46	0.55	1.61	139.0	3.0	46.0	2.2	0.0217	2.2	0.060
4221/1_2.1	0	57	36	0.66	1.06	138.0	8.0	46.0	5.5	0.0217	5.5	0.240
4221/1_3.1	2.74	50	31	0.64	0.93	138.0	6.0	46.0	4.4	0.0217	4.4	0.100
4221/1_4.1	1.70	84	30	0.37	1.56	138.0	3.0	46.0	2.0	0.0216	2.0	0.070
4221/1_5.1	0	44	17	0.40	0.82	139.0	3.0	46.0	1.9	0.0218	1.9	0.170
4221/1_6.1	0.81	157	113	0.74	2.88	136.0	3.0	47.0	2.0	0.0214	2.0	0.170
4221/1_7.1	0.86	129	73	0.59	2.37	136.0	2.0	47.0	1.5	0.0214	1.5	0.120
4221/1_8.1	0	99	79	0.82	1.86	139.0	2.0	46.0	1.7	0.0218	1.7	0.120
4221/1_9.1	1.23	174	96	0.57	3.22	137.0	2.0	46.0	1.4	0.0216	1.4	0.090
4221/1_10.1	1.48	183	153	0.86	3.38	137.0	3.0	46.0	2.2	0.0215	2.2	0.140
4221/1_11.1	0	109	57	0.55	1.99	136.0	2.0	47.0	1.8	0.0214	1.8	0.130
3250/1-6.1	0.61	166	80	0.50	2.30	102.9	2.1	61.8	2.0	0.0161	2.0	0.219
3250/1-9.1	1.35	58	23	0.42	1.09	136.9	3.5	46.0	2.4	0.0215	2.6	0.148
3250/1-2.1	1.35	54	20	0.38	1.02	137.4	3.5	45.8	2.4	0.0215	2.6	0.145
3250/1-5.1	1.49	49	18	0.39	0.93	138.5	3.7	45.4	2.5	0.0217	2.7	0.143
3250/1-3.1	0.97	78	37	0.49	1.48	139.3	3.2	45.3	2.2	0.0219	2.3	0.183
3250/1-10.1	1.22	62	28	0.46	1.19	139.7	3.4	45.1	2.4	0.0219	2.5	0.148
3250/1-1.1	1.34	62	24	0.39	1.20	140.9	3.6	44.7	2.4	0.0221	2.6	0.146
3250/1-6.1re	1.20	63	23	0.37	1.22	141.5	3.5	44.5	2.3	0.0222	2.5	0.149
3250/1-4.1	1.05	67	29	0.44	1.32	143.9	3.4	43.8	2.3	0.0226	2.4	0.157
3250/1-7.1	1.40	53	20	0.39	1.05	144.7	3.7	43.4	2.4	0.0227	2.6	0.134
3250/1-8.1	0.30	523	252	0.50	1.20	144.8	2.5	43.9	1.7	0.0227	1.7	0.403
3253/1-1.1	1.99	135	72	0.55	2.56	141.0	5.0	44.0	3.5	0.0221	3.5	0.300
3253/1-2.1	2.32	79	32	0.42	1.52	143.0	4.0	43.0	2.3	0.0225	2.6	0.100
3253/1-3.1	2.28	84	49	0.61	1.63	145.0	4.0	43.0	2.9	0.0227	3.1	0.200
3253/1-4.1	1.09	115	50	0.45	2.12	137.0	3.0	46.0	2.4	0.0215	2.5	0.200
3253/1-5.1	2.93	54	25	0.48	0.99	134.0	4.0	46.0	2.2	0.0211	2.7	0.100
3253/1-6.1	1.58	198	119	0.62	3.67	138.0	4.0	46.0	2.8	0.0216	2.9	0.200
3253/1-7.1	3.26	123	74	0.63	2.26	137.0	5.0	45.0	3.7	0.0215	3.9	0.100
3253/1-8.1	2.72	126	85	0.70	2.45	144.0	2.0	43.0	1.0	0.0226	1.4	0.100
3253/1-9.1	2.19	106	50	0.49	1.97	138.0	4.0	45.0	3.1	0.0216	3.2	0.100
3253/1-10.1	1.29	124	64	0.53	2.30	138.0	3.0	46.0	2.5	0.0216	2.5	0.200
3253/1-11.1	5.05	74	45	0.63	1.37	138.0	6.0	44.0	4.0	0.0216	4.3	0.100
3253/1-12.1	1.19	156	126	0.83	2.95	141.0	2.0	45.0	1.5	0.0221	1.6	0.100
3255/1_1	0.85	144	60	0.43	2.67	136.2	2.9	46.5	2.1	0.0214	2.1	0.241
3255/1_2	0.63	195	107	0.57	3.65	137.8	2.8	46.0	2.0	0.0216	2.1	0.326
3255/1_3	0.76	75	41	0.56	1.50	147.3	3.3	42.9	2.2	0.0231	2.3	0.247
3255/1_4	0.28	270	171	0.65	5.19	142.1	2.8	44.7	2.0	0.0223	2.0	0.438
3255/1_5	0.49	125	60	0.50	2.37	140.2	3.0	45.3	2.1	0.0220	2.1	0.336
3255/1_6	0.43	179	116	0.67	3.46	142.8	3.0	44.4	2.1	0.0224	2.1	0.353
3255/1_7	0.79	98	53	0.56	1.85	139.6	3.1	45.3	2.2	0.0219	2.2	0.229
3255/1_8	0.61	117	46	0.40	2.29	144.3	3.1	43.9	2.1	0.0226	2.0	0.271
3255/1_9	0.98	130	56	0.45	2.46	138.7	3.0	45.5	2.1	0.0218	2.2	0.234
3255/1_10	0.33	240	103	0.45	4.57	141.2	2.8	45.0	2.0	0.0221	2.0	0.404
3255/1_11	1.17	38	12	0.32	0.74	144.0	3.8	43.7	2.6	0.0226	2.7	0.210

Примечание: SHRIMP-II, ЦИИ ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург. Погрешности соответствуют уровню 1σ; Pb_c и Pb* указывают долю обыкновенного и радиогенного свинца соответственно. Ошибка в калибровке стандарта – для пробы: 0.55 % – 3255/1; 0.57 % – 3253/1; 0.50 % – 3250/1; 0.25 % – 4221/1 (не включена в указанные погрешности). (1) – Скорректированные на ²⁰⁴Pb изотопные отношения.

Изотопные отношения ⁸⁷Sm/¹⁴⁷Sm и величина εNd, пересчитанные на возраст, для гранодиори-

тов Верхне-Кейэтынского массива и яблонско-го комплекса характеризуются положительны-

Таблица 4. Изотопные характеристики циркона из гранитоидов участка Кейэттынский

Table 4. Isotopic characteristics of zircon from the Keyetty site granitoids

№ пробы и точки измерения	²⁰⁶ Pb/c %	U, г/т	Th, г/т	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*, г/т	(1) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U возраст	±%	Total ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±%	(1) ²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	±%	err corr
3126/1_1.1	0	112	55	0.51	2.25	149.5	2.6	42.6	1.8	0.0235	1.8	0.420
3126/1_2.1	0.97	144	87	0.62	2.84	145.2	2.5	43.5	1.6	0.0228	1.7	0.158
3126/1_3.1	0.36	341	180	0.55	6.8	147.4	2.2	43.1	1.5	0.0231	1.5	0.319
3126/1_4.1	0	155	84	0.56	3.13	149.3	2.4	42.7	1.6	0.0234	1.6	0.442
3126/1_5.1	1.13	109	46	0.44	2.16	146.0	2.6	43.2	1.7	0.0230	1.8	0.122
3126/1_6.1	0	95	53	0.58	1.86	145.8	2.6	43.7	1.8	0.0229	1.8	0.395
3126/1_7.1	0.68	127	70	0.57	2.57	149.3	2.5	42.4	1.6	0.0234	1.7	0.238
3126/1_8.1	0	92	37	0.42	1.81	145.4	2.6	43.9	1.8	0.0228	1.8	0.361
3126/1_9.1	0.83	105	66	0.65	2.08	146.0	2.5	43.3	1.7	0.0229	1.8	0.193
3126/1_10.1	0	139	61	0.46	2.82	150.8	2.4	42.3	1.6	0.0237	1.6	0.432
3112_1.1	0	165	57	0.36	3.18	143.6	2.3	44.4	1.6	0.0225	1.6	0.441
3112_2.1	0.69	227	112	0.51	4.34	140.7	2.2	45.0	1.5	0.0221	1.6	0.218
3112_3.1	0.89	188	70	0.38	3.61	140.8	2.3	44.9	1.6	0.0221	1.6	0.189
3112_4.1	0.42	307	147	0.50	5.84	140.5	2.1	45.2	1.5	0.0220	1.5	0.286
3112_5.1	0.98	185	70	0.39	3.56	141.0	2.3	44.8	1.6	0.0221	1.7	0.139
3112_6.1	0.41	225	119	0.54	4.23	139.0	2.1	45.7	1.5	0.0218	1.6	0.298
3112_7.1	0.50	183	76	0.43	3.53	142.8	2.3	44.4	1.6	0.0224	1.6	0.268
3112_8.1	0.52	183	62	0.35	3.42	138.1	2.3	46.0	1.6	0.0217	1.7	0.263
3112_8.2	0	114	33	0.30	2.17	141.0	2.3	45.2	1.7	0.0221	1.7	0.396
3112_9.1	0.71	181	102	0.58	3.38	137.4	2.3	46.1	1.6	0.0216	1.7	0.206
3112_10.1	0.88	108	47	0.45	2.03	138.1	2.4	45.8	1.7	0.0217	1.8	0.174
3112_10.2	0	115	36	0.33	2.1	135.3	2.3	47.1	1.7	0.0212	1.7	0.397
3114_10.1	0	231	168	0.75	4.31	138.7	1.1	46.0	0.8	0.0218	0.8	0.300
3114_2.1	0	147	77	0.55	2.86	144.6	1.4	44.1	1.0	0.0227	1.0	0.300
3114_3.1	0.96	150	116	0.80	2.96	144.5	1.8	44.1	1.3	0.0228	1.3	0.100
3114_4.1	0	105	67	0.66	2.03	143.5	1.9	44.4	1.3	0.0225	1.3	0.300
3114_5.1	0.50	411	522	1.31	7.91	142.0	1.0	44.9	0.7	0.0223	0.7	0.100
3114_6.1	0.88	238	198	0.86	4.58	141.6	1.3	45.0	1.0	0.0222	1.0	0.100
3114_7.1	0	97	54	0.58	1.87	143.1	1.7	44.6	1.2	0.0225	1.2	0.300
3114_7.2	0	67	27	0.42	1.29	142.4	2.0	44.8	1.4	0.0223	1.4	0.300
3114_8.1	0	113	73	0.67	2.15	141.6	1.6	45.0	1.1	0.0222	1.1	0.300
3114_9.1	0	318	328	1.06	5.98	139.6	1.1	45.7	0.8	0.0219	0.8	0.300
4159/1_1.1	1.51	105	46	0.45	2.02	140.8	2.4	45.29	1.7	0.0221	1.7	0.100
4159/1_10.1	2.01	76	39	0.53	1.54	146.6	3.0	43.5	2.0	0.0230	2.0	0.100
4159/1_2.1	1.49	104	60	0.59	2.08	146.1	2.5	43.6	1.7	0.0229	1.7	0.100
4159/1_3.1	1.06	151	130	0.89	2.98	145.1	2.1	43.9	1.5	0.0228	1.5	0.100
4159/1_4.1	1.13	143	81	0.59	2.8	143.5	2.2	44.4	1.5	0.0225	1.5	0.100
4159/1_5.1	1.25	127	75	0.61	2.58	149.0	2.5	42.8	1.7	0.0234	1.7	0.100
4159/1_6.1	1.50	104	45	0.44	2.07	145.4	2.5	43.9	1.7	0.0228	1.7	0.100
4159/1_7.1	1.97	77	38	0.50	1.58	148.5	3.0	42.9	2.0	0.0233	2.0	0.100
4159/1_8.1	1.09	143	94	0.68	2.84	145.5	2.2	43.8	1.5	0.0228	1.5	0.100
4159/1_9.1	1.35	116	84	0.76	2.28	144.5	2.4	44.1	1.7	0.0227	1.7	0.100

Примечание: SHRIMP-II, ЦИИ ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург. Погрешности соответствуют уровню 1-сигма; Pb_c и Pb* указывают долю обыкновенного и радиогенного свинца соответственно. Ошибка в калибровке стандарта – для проб: 0.42 % – 3112, 3126/1; 0.24 % – 3114; 0.29 % – 4159/1 (не включена в указанные погрешности). (1) – Скорректированные на ²⁰⁴Pb изотопные отношения.

ми значениями $\epsilon\text{Nd}(t) + 5.6$ и $+ 8.7$ соответственно и низкими значениями $^{87/86}\text{Sr}(t) = 0.703579$ и

0.703044, что указывает на отсутствие древней континентальной коры Омолонского массива в

Таблица 5. Результаты Rb–Sr и Sm–Nd изотопного анализа гранодиоритов Верхне-Кейэтынского массива и яблонского комплекса ОЧВП

Table 5. Results of Rb–Sr and Sm–Nd isotope analysis of granodiorites of the OCVF Upper-Keyetty massif and the Yablon complex

Обра- зец	Содержание элементов, г/т		Изотопные отношения				Расчетные параметры		
Верхне-Кейэтынский массив (кейэтынский комплекс), U–Pb – 140 млн л.									
3112*	[Rb]	[Sr]	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	±2σ %	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±2σ %	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)t		
	74.1	329	0.65168	0.171	0.704874	0.0007	0.703579		
	[Sm]	[Nd]	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ %	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ %	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd)t	εNd(0)	εNd(t)
	3.45	16.7	0.12505	0.241	0.512859	0.0005	0.512744	4.31	5.6
яблонский комплекс ОЧВП, U–Pb – 108 млн л.									
4181/1	[Rb]	[Sr]	⁸⁷ Rb / ⁸⁶ Sr	±2σ %	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±2σ %	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)t		
	46.8	444	0.30528	0.151	0.703513	0.0006	0.703044		
	[Sm]	[Nd]	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ %	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ %	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd)t	εNd(0)	εNd(t)
	2.26	12.1	0.11284	0.184	0.513024	0.0016	0.512945	7.53	8.7

Примечание. Величина параметра $\epsilon\text{Nd}(t)$ рассчитана относительно состава однородного хондритового резервуара (CHUR): $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0,08160$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70450$. * – Старикова, Гагиева и др. (2023).

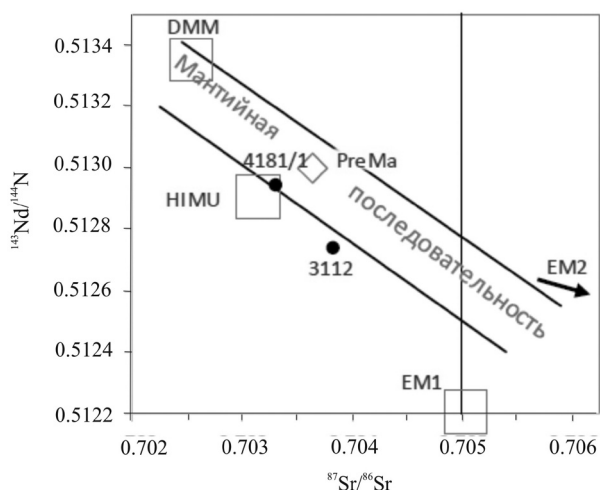


Рис. 8. Диаграмма $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, изотопный состав гранодиоритов Верхне-Кейэтынского массива (3112) и яблонского комплекса (4181/1), см. (Zindler, Hart, 1985). DMM – деплетированная мантия, HIMU – обогащенная (U + Th/Pb) мантия, PreMa – примитивный состав мантии, EM – обогащенная мантия, аналог нижнекорового (1) и верхнекорового (2) источника вещества.

Fig. 8. Diagram for $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, isotopic composition of granodiorites of the Upper-Keyetty massif (3112) and the Yablon complex (4181/1), see (Zindler, Hart, 1985). DMM – depleted mantle, HIMU – enriched (U + Th/Pb) mantle, PreMa – primitive composition of the mantle, EM – enriched mantle, analogue of the lower crustal (1) and upper crustal (2) source of matter.

источнике магм и характерно для энсиматических островных дуг. На диаграмме в координатах $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ – $\epsilon\text{Nd}(t)$ их точки располагаются в пределах области изотопных значений для вулканитов Анадырского и Центрально-Чукотского сегментов

ОЧВП (рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные новые данные по геологии, геохимии и геохронологии раннемеловых интрузивных массивов восточной части Олойской зоны корректируют представления о возрасте, составе и их месте в тектонических структурах Северо-Востока России. Обнаружение изотопных датировок – 147–138 млн л. (поздний титон – берриас) – в цирконах из раннемеловых (альбских) гранитоидов яблонского и олойского комплексов оказалось неожиданным для авторов. Дальнейшие исследования вынужденно ограничивались малым набором лабораторных образцов, полученных ранее при полевых исследованиях. Имеющийся массив новых петрогеохимических данных еще далек от статистически выверенных выборок, что обусловлено неравномерностью опробования разновидностей пород представленных комплексов. Анализ петрогеохимических и геохронологических материалов (в т. ч. результаты современных методов исследования) позволяет авторам прийти к заключению о возможности выделения здесь двух новых плутонических комплексов – трехглавого и кейэтынского, по составу близких диорит-гранодиоритовой формации. Полученные данные свидетельствуют о близости их петрографического и петрогеохимического составов, при незначительной разнице в значениях изотопного возраста, которую с учетом погрешности можно признать несущественной. Тем не менее некоторые особенности их геологического положения и состава позволяют предварительно оценить степень дискретности относительно поперечной зональности

Олойской дуговой системы и сравнить их в следующих аспектах:

Геологический. Фронтальная зона Олойской дуговой системы на современных структурно-формационных схемах районирована большей частью условно, базируясь преимущественно на геологических данных. В соответствии с принятыми структурно-фациальными схемами здесь выделена Вукваамская СФЗ (Решения..., 2009; Старикова, Гагиева и др., 2023). В пределах зоны широко распространены раннемеловые (неокомовые) массивы егдэгкычского комплекса, относимые к монзонит-сиенитовой формации (Масайтис и др., 1979); они образуют ареал в виде субширотной полосы от верховьев р. Бол. Анюй до нижнего течения р. Омолон. В восточной части зоны, в бассейне р. Алучин, результатами наших исследований установлены разновозрастные им интрузивные массивы, впервые выделяемые как трехглавый комплекс диорит-гранитовой формации. Определение масштабы их распространения на площади на сегодняшний день затруднительно, т. к. выделенные здесь ранее массивы ранне-поздне мелового яблонского и раннемелового (альб?) олойского комплекса не охарактеризованы современными петрохимическими и геохрометрическими методами.

Тыловая часть Олойской дуговой системы районирована здесь в составе Ильгуйево-СФЗ (Решения..., 2009), которая с юга сочленяется со структурами Омолонской глыбы (массива). Здесь распространены многочисленные интрузивы диорит-гранодиоритовой формации, выделенные при геологосъемочных работах в составе олойского комплекса; вычленение из их состава интрузивов кейэттынского комплекса большей частью основано на результатах **U–Pb** изотопного датирования. Полученные новые данные показали более древние значения возраста (147–138 млн л.), чем ранее определялось **K–Ar** датированием (136–84 млн л.). Вероятно, в олойский комплекс были включены разновозрастные массивы (в т. ч. ранне-поздне меловой яблонский комплекс), изучение которых является предметом дальнейших исследований.

Выделенные трехглавый и кейэттынский комплексы сопоставимы с намындыканским диорит-гранодиоритовым комплексом (с возрастом 143–136 млн л., см. (Шатова, Серегин, 2022)), распространенным на Омолонском массиве (Намындыкан-Моланджинская зона) и прилегающих к нему структурах Олойской зоны. Однако связывать формирование намындыканского комплекса с террито-

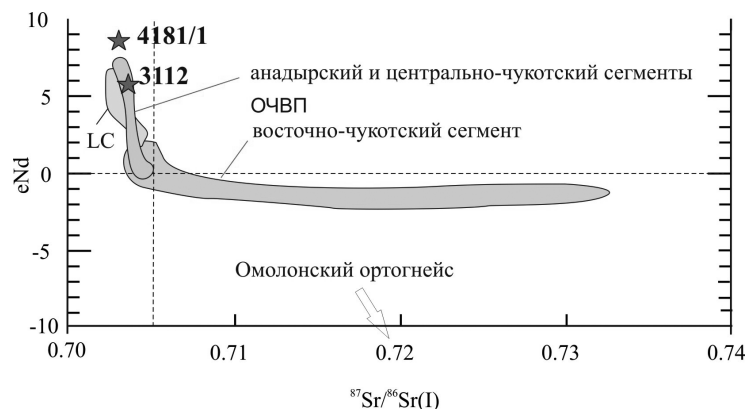


Рис. 9. Диаграмма ϵNd и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{i})$, изотопный состав гранитоидов Верхне-Кейэттынского массива и яблонского комплекса в сравнении с данными по Чукотке и чукотским сегментам ОЧВП из работ (Tikhomirov et al., 2008, 2023; Акинин, Миллер, 2011; Акинин и др., 2022). Поля составов горных пород (серая заливка) различных сегментов ОЧВП (названия на рисунке), поле LC – средний состав нижней коры Северо-Востока РФ, по данным изучения глубинных ксенолитов в щелочных базальтах (Акинин и др., 2013). Стрелка – направление точки состава Омолонского палеопротерозойского ортогнейса ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7210$, $\epsilon\text{Nd}(\text{i}) = -28$), см. (Акинин и др., 2022). Звездочки – изотопный состав гранодиоритов Верхне-Кейэттынского массива (3112) и яблонского комплекса (4181/1).

Fig. 9. Diagram for ϵNd and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{i})$, isotopic composition of granitoids of the Upper-Keyetty massif and the Yablon complex in comparison with data on Chukotka and the OCVB Chukotka segments from (Tikhomirov et al., 2008, 2023; Akinin, Miller, 2011; Akinin et al., 2022). Rock compositions fields (gray fill) of OCVB different segments (names in the Figure), field LC – average composition of the lower crust of Russia's North-East, according to the study of deep xenoliths in alkaline basalts (Akinin et al., 2013). Arrow shows direction of the composition point of the Omolon Paleoproterozoic orthogneiss ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7210$, $\epsilon\text{Nd}(\text{i}) = -28$), see (Akinin et al., 2022). Asterisks mark isotopic composition of granodiorites of the Upper-Keyetty massif (3112) and the Yablon complex (4181/1).

риально отдаленной Олойской дуговой системой следует осторожно, поскольку в это же время (в титоне–готериве) на восточной (в современных координатах) окраине Евразийского континента продолжалось формирование Удско-Мургальской дуговой системы, представляющей собой надсубдукционный вулканический пояс северо-восточного простирания (Парфенов, 1984).

Петрогеохимический. Петрогеохимические различия приводятся только для вновь выделенных комплексов, по причине отсутствия современных петрогеохимических данных для большинства массивов, изученных ранее. На примере диаграмм, связывающих концентрации петрогенных окислов SiO_2 и K_2O с отношением $(\text{La}/\text{Yb})_N$, показаны основные тенденции в различии их составов. Несмотря на то что поля составов пород кейэттынского и трехглавого комплексов частично перекрывают друг друга, в породах трехглавого комплекса отмечается возрастание величины

$(La/Yb)_N$ с увеличением содержания кремнезема и окиси калия, тогда как породы кейэйттынского комплекса отличает низкокалиевая специализация с пониженными значениями $(La/Yb)_N$.

Наблюдаемый устойчивый тренд увеличения величины $(La/Yb)_N$ по мере роста кремнистости и калиевости в породах трехглавого комплекса косвенно указывает на более интенсивно проявленную кристаллизационную дифференциацию при их формировании, сопровождавшуюся фракционированием темноцветных минералов (пироксенов, роговой обманки). С геодинамической позиции данное возможно в случае удержания магмы в промежуточных очагах, вызванного усилением тангенциального сжатия и сопровождаемого увеличением мощности и жесткости коры при снижении её проницаемости, что, в свою очередь, может быть обусловлено начавшейся коллизией, связанной с закрытием Южно-Аннуйского океанического пространства и столкновением Чукотского микроконтинента с Сибирью (Соколов и др., 2001, 2015). Заключительная фаза коллизии материалами изотопного датирования устанавливается границей баррема и апта (Amato et al., 2015) или аптским веком – 120–115 млн л. (Тихомиров, 2020).

Геохронологический. Формирование интрузивных тел кейэйттынского и трехглавого комплексов, согласно материалам U–Pb (SHRIMP-II) датирования (147–140 и 142–138 млн л. соответственно), происходило приблизительно (с учетом ошибки) одновременно. Данные о возрасте гранитоидов егдэгкычского комплекса (144–133 млн л., неоком), распространенных севернее района исследований (левобережье р. Бол. Ануй), позволяют заключить, что ко второй половине берриаса активность магматических процессов сместилась во фронтальную часть Олойской дуговой системы; с геодинамических позиций данное может быть связано с резким увеличением угла падения в зоне субдукции в момент критического сближения Чукотского микроконтинента с Сибирью.

Минерагенический. Устанавливаются пространственные и временные взаимоотношения выделенного трехглавого комплекса с егдэгкычским и весеннинским комплексами, которые являются рудогенерирующими и рудовмещающими для уникальных золото- и серебросодержащих медно-молибден-порфировых месторождений Песчанка, Находка, Весенний. Минерагеническая позиция магматических образований трехглавого комплекса требует внимательного рассмотрения.

Дополнительным источником информации о природе раннемелового магматизма Олойской зоны может служить сопоставление доальбских гранитоидов (трехглавый и кейэйттынский комплексы) с альб-сантонскими гранитоидами (яблонский и воронцовский комплексы) и вулканитами ОЧВП (рис. 4, 8, 9). Интрузивные комплексы характеризуются схожими спектрами распределения примесных и петрогенных элементов, в це-

лом свойственных субдукционным гранитам. На геодинамических диаграммах точки составов гранитоидов трехглавого и кейэйттынского комплексов попадают в область гранитоидов вулканических дуг и надсубдукционных гранитов. Первичные изотопные отношения Sr- и Nd гранитоидов трехглавого и кейэйттынского комплексов указывают на формирование из мантийного источника вещества, а точки их составов попадают в область изотопных значений вулканитов Анадырского и Центрально-Чукотского сегментов ОЧВП.

Формирование неокотовых интрузивных комплексов Олойской зоны связано с поздним этапом развития Олойской дуговой системы. Начиная с берриаса в тыловой части дуги активные вулканические процессы постепенно затухали. Ближе ко второй половине берриаса здесь, в прибрежно-морских обстановках остаточных или окраинных бассейнов, происходило накопление преимущественно терригенных вулканомиктовых осадков, которое прослеживается до готерива. Во фронтальной части дуги почти до конца берриаса продолжалась эксплозивная деятельность с отложением туфового материала; ее отголоски достигали и остаточных бассейнов в тыловой части дуговой системы (Старикова, Коновалов и др., 2023).

Ближе ко второй половине берриаса внедрение интрузивных массивов кейэйттынского комплекса продолжалось на фоне формирования вулканомиктовых и терригенных (с карбонатами) отложений, заполняющих остаточные бассейны. Низкие значения $(La/Yb)_N$ и калиевости пород кейэйттынского комплекса в тыловой части островодужной системы противоречат классическим представлениям о поперечной зональности субдукционных поясов, согласно работам исследователей (Wilson, 1989; Фролова, Бурикова, 1997; Best, Christiansen, 2001 и др.). В нашем случае данный факт может быть отражением подъема теплового диапира в тыловой части дуги и вовлечением в процесс магнеообразования менее обогащенных участков верхней мантии либо свидетельствовать о взаимодействии с веществом континентальной коры – влиянием неоднородного материала фундамента, состоящего из разнородных блоков (террейнов различного состава).

Магматическая активность фронтальной части Олойской дуговой системы продолжалась до конца валанжина, согласно материалам изотопного датирования – 144–133 млн л., что логично связать с начавшейся коллизией, обусловленной закрытием Южно-Аннуйского океанического пространства и столкновением Чукотского микроконтинента с Сибирью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ геологических, петрогеохимических, геохронологических и изотопных данных позволяет расширить представления о позднеюрско-

раннемеловом надсубдукционном магматизме Олойской дуговой системы.

Проведенные исследования интрузивных образований, рассматриваемых ранее в составе олойского и яблонского комплексов альбского возраста, позволили получить новые данные о геохимическом составе и изотопном возрасте пород. Для гранитоидных массивов по циркону получены U–Pb (SHRIMP-II) датировки в интервале 147–138 млн л. (поздний титон – ранний валанжин). Полученные значения возраста гранитоидов оказываются древнее возрастных характеристик олойского и яблонского комплексов, что послужило основанием для выделения новых плутонических комплексов – кейэттынского (147–140 млн л.) и трехглавого (142–138 млн л.).

Выделенные кейэттынский и трехглавый комплексы с мантийными изотопными характеристиками магм одновозрастны известным здесь неокомовым образованиям монзонит-сиенитовой и диорит-гранодиоритовой формаций (егдэгкычский и весеннинский комплексы). В совокупности раннемеловые (неокомовые) гранитоиды образуют латеральный ряд комплексов, которые формируют надсубдукционный интрузивный пояс, принадлежащий большей частью Олойской дуговой системе.

Надсубдукционный интрузивный магматизм функционировал и после затухания вулканической деятельности Олойской островодужной системы (вторая половина берриаса) вплоть до конца валанжина; его заключительные импульсы, вероятно, были связаны с начавшейся коллизией – затягиванием в зону субдукции блоков континентальной коры Чукотского микроконтинента.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам, участвовавшим в проведении полевых и лабораторных работ. Авторы признательны В. В. Акинину и П. П. Тихомирову за содержательные и конструктивные замечания и ценные советы, а также В. И. Шпикерману, оказавшему поддержку при подготовке публикации.

Финансирование работ осуществлялось по Государственному заданию, выданному ФГБУ «ВСЕГЕИ» Федеральным агентством по недропользованию (Роснедрами) на 2019–2021 гг. в рамках выполнения работ ГДП-200 Верхне-Олойской площади.

ЛИТЕРАТУРА

Акинин В. В., Андроников А. В., Мукаса С. Б., Миллер Э. Л. Меловая нижняя кора континентального обрамления северной Пацифики: петролого-геохронологические данные по ниже-среднекоровым ксенолитам // *Петрология*. 2013. Т. 21. № 1. С. 34–73.

Акинин В. В., Котляр И. Н. ГЕОХРОН – компьютерная база данных изотопного датирования минералов, горных пород и руд Северо-Востока России // *Магматизм и оруденение Северо-Востока России* / Ред. С. Г. Бялобжеский. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1997. С. 313–318.

Акинин В. В., Миллер Э. Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // *Петрология*. 2011. Т. 19. № 3. С. 249–290. DOI: 10.1134/S0869591111020020.

Акинин В. В., Ползуненков Г. О., Готтлиб Э. Ш., Миллер Э. Л. Меловой монзонит-гранит-мигматитовый Велиткенский комплекс: петрология, геохимия пород и циркона (U–Pb, Hf и O) в приложении к реконструкции эволюции магматизма и континентальной коры в блоке Арктическая Аляска – Чукотка // *Петрология*. 2022. Т. 30. № 3. С. 227–259. DOI: 10.31857/S0869590322030025.

Антипин В. С., Коваленко А. И., Рябчиков И. Д. Коэффициенты распределения редких элементов в магматических породах. Москва : Наука, 1994. 251 с.

Белый В. Ф. Геология Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1994. 76 с.

Белый В. Ф. Формации и тектоника Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Москва : Наука, 1978. 213 с.

Берлибле Д. Г., Городинский М. Е., Котляр И. Н. Меловой интрузивный магматизм Анюйско-Олойского блока // *Магматизм Северо-Востока Азии. Труды Первого Северо-Восточного петрографического совещания*. Ч. 2. Магматические комплексы / Ред. Е. Т. Шаталов. Магадан : Книжное издательство, 1975. С. 52–54.

Берлибле Д. Г., Калныня В. А. Связь золотого оруденения с магматическими комплексами Иннахского золоторудного района. Отчет по теме 14. Билибино, 1971. № 615. 258 с.

Воронец Л. Л., Вяткин Б. В. Легенда Анадырской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Анадырь, 2002. 122 с.

Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург : УрО РАН, 2009. 383 с.

Гусев Г. С., Межеловский Н. В., Морозов А. Ф., Килипко В. А. Схема тектонического районирования территории России. Масштаб 1 : 5 000 000. Объяснительная записка. Москва, 2001. 99 с. (МПП РФ, ИМГРЭ, ГЕОКАРТ).

Исаева Е. П., Звезда Т. В., Лазарева Е. И., Мазуркевич К. Н., Падерин Г. П. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Чукотская. Лист Q-58 – Алискерово. Объяснительная записка. Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО «Георегион». Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2019. 371 с. + 4 вкл.

Кара Т. В. Новые данные о возрасте магматических комплексов Алазейско-Олойской складчатой системы (Западная Чукотка) // *Тихоокеанская геология*. 2018. Т. 37. № 6. С. 107–115.

Кара Т. В., Тихомиров П. Л., Демин А. Д. Новые сведения о возрасте магматических событий в Олойской складчатой зоне, Западная Чукотка (по результатам U–Pb-датирования цирконов) // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 489. № 2. С. 161–165.

Комарова Я. С., Костицын Ю. А., Николаев Ю. Н. Rb–Sr-возраст диорит-порфира Аскет из Мангазейского интрузивного комплекса, Центральная Чукотка // *Тезисы докладов IX Международной школы наук о Земле им. Л. Л. Перчука*. Одесса : ОНУ им. И. И. Мечникова, 2013. С. 79–83.

Котова М. С., Нагорная Е. В., Аносова М. О., Костицын Ю. А., Бакшеев И. А., Николаев Ю. Н., Калько И. А.

Датирование метасоматического процесса и рудоносных гранитоидов медно-порфировых месторождений Находкинского рудного поля (Западная Чукотка) // Материалы V Российской конференции по изотопной геохронологии. Москва : ИГЕМ РАН, 2012. С. 181–184.

Кузнецов В. М., Гавриш А. В., Шведов С. Д., Же-лебогло О. В., Бондаренко С. А., Гусев Е. А., Вопилов-ская О. А., Иванова В. В., Разуваева Е. И., Супрун-енко О. И., Усов А. Н., Алексеев Д. И., Беликова О. А., Шпикерман Е. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Верхояно-Колымская. Лист Q-57 – Омолон. Объяснительная записка. Минпри-роды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2022. 519 с.

Луцицкая М. В., Кара Т. В., Катков С. М. Новые данные о возрасте массива Ничан Олойского вул-канического пояса (Западная Чукотка) // Бюллетень Мос-ковского общества испытателей природы. Отделение геологическое. 2018. Т. 93. Вып. 2. С. 27–33.

Масайтис В. Л., Москалева В. Н., Румянцев Н. А., Александрова С. В., Беляев Г. М., Блюман Б. А., Быков-ская Е. В., Верхало-Узский В. Н., Горецкая Е. Н., Демид-ова Т. Я., Кангур М. А., Лесков С. А., Мошкин В. Н., Никольская В. П., Орлова М. П., Остроумова В. С., Павлова В. П., Решетова С. А., Ротман В. К., Станке-вич Е. К., Толмачева Е. В., Трофимов В. А., Центер И. Я., Шарпенко Л. Н., Шнай Г. К. Магматические форма-ции СССР. Ленинград : Недра, 1979. Т. 2. 279 с.

Мерзляков В. М., Терехов М. И., Лычагин П. П., Ды-левский Е. Ф. Тектоника Омолонского массива // Гео-тектоника. 1982. № 1. С. 74–85.

Милов А. П. Позднемезозойские гранитоидные формации Центральной Чукотки. Новосибирск : На-ука, 1984. 133 с.

Парфенов Л. М. Континентальные окраины и островные дуги в мезозоидах Северо-Востока Азии. Новосибирск : Наука, 1984. 192 с.

Парфенов Л. М. Тектоника Верхояно-Колымских мезозоид в контексте тектоники плит // Тектонофизи-ка. 1991. Т. 199. С. 319–342.

Решения Третьего межведомственного регио-нального стратиграфического совещания по докемб-рию, палеозою и мезозою Северо-Востока России / Ред. Т. Н. Корень, Г. В. Котляр. Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2009. 268 с.

Русаков И. М., Виноградов В. А. Эвгеосинклиналь-ная и миогеосинклинальная области Северо-Востока СССР // Ученые записки НИИГА, региональная гео-логия. Ленинград, 1969. Вып. 15. С. 5–27.

Соколов С. Д. Очерк тектоники Северо-Востока Азии // Геотектоника. 2010. № 6. С. 60–78.

Соколов С. Д., Бондаренко Г. Е., Морозов О. Л., Ганелин А. В., Подгорный И. И. Покровная тектоника Южно-Аньюской сuture (Западная Чукотка) // Док-лады Академии наук. 2001. Т. 376. № 1. С. 80–84.

Соколов С. Д., Диденко А. П., Григорьев В. Н., Алек-сютин М. В., Бондаренко Г. Е., Крылов К. А. Палеон-тологические реконструкции Северо-Востока Рос-сии : Проблемы и неопределенности // Геотектоника. 1997. № 6. С. 72–90.

Соколов С. Д., Тучкова М. И., Ганелин А. В., Бон-даренко Г. Е., Лейер П. Тектоника Южно-Аньюской сuture (Северо-Восток Азии) // Геотектоника. 2015. № 1. С. 5–30.

Соколов С. Д., Тучкова М. И., Леднева Г. В., Луцицкая М. В., Ганелин А. В., Ватрушкина Е. В., Моисеев А. В.

Тектоническая позиция Южно-Аньюской сuture // Геотектоника. 2021. № 5. С. 51–73.

Старикова Е. В., Гагиева А. М., Коновалов А. Л., Ватрушкина Е. В., Акинин В. В. Верхнеюрско-ранне-меловые отложения восточной части Олойской зоны: стратиграфия, геохимия, возраст и геодинамические обстановки формирования // Тихоокеанская геология. 2023. № 4. С. 3–29.

Старикова Е. В., Коновалов А. Л., Черкашин А. В., Неклюдов Г. А., Матюшков А. Д., Гагиева А. М., Соро-кина Ю. П., Петров В. В., Чуйко М. А. Государствен-ная геологическая карта Российской Федерации мас-штаба 1 : 200 000. Изд. 2-е. Серия Анадырская. Лист Q-58-XXI, XXII (г. Черная). Объяснительная записка. Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ». Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2023. 281 с.

Тихомиров П. Л. Меловой окраинно-континенталь-ный магматизм Северо-Востока Азии и вопросы генези-са крупнейших фанерозойских провинций кремнекис-лого вулканизма. Москва : ГЕОС, 2020. 376 с.

Тихомиров П. Л., Прокофьев В. Ю., Калько И. А., Аплеталин А. В., Николаев Ю. Н., Кобаяси К., Накаму-ра Э. Постколлизийный магматизм Западной Чукот-ки и раннемеловая тектоническая перестройка Северо-Востока Азии // Геотектоника. 2017. № 2. С. 32–54.

Фролова Т. И., Бурикова И. А. Магматические фор-мации современных геотектонических обстановок. Москва : МГУ, 1997. 320 с.

Фурман О. А. Легенда Олойской серии листов Го-сударственной геологической карты РФ масштаба 1 : 200 000. Билибино : Аньюское ГТГП, 1999. 286 с.

Читалин А. Ф., Николаев Ю. Н., Бакиев И. А., Прокофьев В. Ю., Фомичев Е. В., Усенко В. В., Нагор-ная Е. В., Марущенко Л. И., Сидорина Ю. Н., Джеб-жея Г. Т. Порфирово-эпитегрмальные системы Баим-ской рудной зоны, Западная Чукотка // Смирновский сборник-2016. Проблемы минерации, экономиче-ской геологии и минеральных ресурсов. Ч. I. Про-блемы минерации, экономической и экологической геологии, минералогического музейного дела и глу-бинной минералогии / Ред. В. И. Старостин. Москва : МАКС-Пресс, 2016. С. 82–115.

Шарпенко Л. Н., Костин А. Е., Кухаренко Е. А. TAS-диаграмма сумма щелочей – кремнезем для хи-мической классификации и диагностики плутониче-ских пород // Региональная геология и металлогения. 2013. № 56. С. 40–50.

Шатова Н. В., Серегин С. В. Новые изотопные данные для пород намындыканского и виторинско-го комплексов как индикатор принадлежности к вул-каническим поясам Северо-Востока // Геология на окраине континента. Материалы II молодежной науч-ной конференции-школы ДВГИ ДВО РАН. Владиво-сток : ДВФУ, 2022. С. 34–39. 1 CD-ROM, [231 с.]. DOI: 10.24866/7444-5330-5.

Шило Н. А., Гельман М. Л., Мерзляков В. М., Те-рехов М. И., Тильман С. М. Алазейско-Олойская эв-геосинклинальная система – новый элемент мезозо-ид Северо-Востока СССР // Доклады АН СССР. 1973. Т. 210. № 5. С. 1174–1177.

Akinin V. V., Miller E. L., Toro J., Prokopiev A. V., Got-tlieb E. S., Pearcey S., Polzunenkov G. O., Trunilina V. A. Episodicity and the dance of late Mesozoic magmatism and deformation along the northern circum-Pacific mar-gin: north-eastern Russia to the Cordillera // Earth-Sci-ence Reviews. 208103272. 2020. P. 1–25.

- Amato J. M., Toro J., Akinin V. V., Hampton B. A., Salnikov A. S., Tuchkova M. I. Tectonic evolution of the Mesozoic South Anyui suture zone, eastern Russia: A critical component of paleogeographic reconstructions of the Arctic region // *Geosphere*. 2015. Vol. 11. No. 5. P. 1530–1564.
- Batchelor R. A., Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters // *Chemical Geology*. 1985. Vol. 48. P. 43–55. DOI: 10.1016/0009-2541(85) 90034-8.
- Best M. G., Christiansen E. H. *Igneous petrology*. Oxford : Blackwell Science, 2001. 458 p.
- Boynton W. V. Geochemistry of rare Earth elements: meteorite studies / Ed. P. Henderson // *Rare Earth Element Geochemistry*. New York : Elsevier, 1984. P. 63–114. DOI: 10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3.
- Irvine T. N., Baragar W. R. A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1971. Vol. 8. No. 5. P. 523–548. DOI: 10.1139/e71-055.
- Kastamonu area, Northern Turkey // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1976. Vol. 58. No. 1. P. 63–81.
- Ludwig K. R. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, USA : Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- Maeda J. Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of Central Hokkaido, North Japan // *Tectonophysics*. 1990. No. 174. P. 235–255.
- Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // *Journal of Petrology*. 1984. Vol. 25. P. 956–983. DOI: 10.1093/petrology/25.4.956.
- Peccerillo A., Taylor S. R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1976. Vol. 58. P. 63–81.
- Shand S. J. Eruptive rocks: their genesis, composition, classification, and their relation to ore deposits with a chapter on meteorites. New York : John Wiley and Sons, 1943. 488 p.
- Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / Eds. A. D. Saunders, M. J. Norry // *Magmatism in the ocean basins. Special Publications*. 42. London : Geological Society, 1989. P. 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.
- Tikhomirov P. L., Kalinina E. A., Kobayashi K., Nakamura E. Late Mesozoic silicic magmatism of the North Chukotka area (NE Russia): Age, magma sources, and geodynamic implications // *Lithos*. 2008. Vol. 105. P. 329–346.
- Tikhomirov P. L., Luchitskaya M. V., Prokofiev Yu. V., Akinin V. V., Miller E. L., Isaeva E. P., Palechek T. N., Starikova E. V., Boldyreva A. I., Wiegand B. Evolution of Aptian and Albian magmatism of Western and Northern Chukotka (Northeast Russia) based on zircon U–Pb geochronology and rock geochemistry // *International Geology Review*. 2023. Vol. 66. No. 2. P. 607–632. DOI: 10.1080/00206814.2023.2205494.
- Williams I. S. U–Th–Pb geochronology by ion microprobe / Eds. M. A. McKibben, W. C. Shanks III, W. I. Ridley // *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Reviews in Economic Geology*. 1998. Vol. 7. P. 1–35.
- Wilson M. *Igneous petrogenesis: a global tectonic approach*. London : Unwin Hyman, 1989. 466 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-6788-4.
- Zindler A., Hart S. R. Chemical geodynamics // *Annual Review of Earth and Planetary Science Letters*. 1986. Vol. 14. P. 493–571. DOI: 10.1146/annurev. ea.14.050186.002425.

Поступила в редакцию 15.04.2024.

Поступила после доработки 17.05.2024.

EARLY CRETACEOUS GRANITOID COMPLEXES OF THE OLOY ZONE (Western Chukotka)

Konovalov A. L.¹, Cherkashin A. V.¹, Starikova E. V.¹, Surin T. N.¹, Gagieva A. M.²

¹ A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), St. Petersburg

² North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n. a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan

The article presents new data on the age, composition, and structure of granitoid massifs located in the eastern part of the Oloy zone, previously attributed to the Oloy and Yablon plutonic complexes of the Okhotsk-Chukotka volcano-plutonic belt. For a number of massifs, precision dating (U–Pb, SHRIMP-II) established age values in the range of 147–138 Myr, which corresponds to the final stage of the Alazeya-Oloy folded system development. The paper also discusses the results of geological-petrochemical and geochronometric studies of intrusive massifs, their position relative to the Late Jurassic – Early Cretaceous supra-subduction magmatic belts of the Oloy and Uda-Murgal arc systems.

Keywords: Alazeya-Oloy folded system, granitoids, U–Pb geochronology, petrogeochemistry, isotope studies, tectonics, volcanic arcs, collision, Western Chukotka.

REFERENCES

- Akinin, V. V., Andronikov, A. V., Mukasa, S. B., Miller, E. L., 2013. Cretaceous Lower Crust of the North Pacific Continental Rim: Petrological and Geochronological Data on Lower-Middle Crustal Xenoliths, *Petrology*. 21 (1), 34–73 [In Russian].
- Akinin, V. V., Kotlyar, I. N., 1997. GEOCHRON – Computer Database of Isotopic Dating for Minerals, Rocks, and Ores in Russia's North-East, *Magmatism and Mineralization of Russia's North-East*. Ed. S. G. Bialobzhesky. Magadan, NEISRI FEB RAS, 313–318 [In Russian].

- Akinin, V. V., Miller, E. L., 2011. Evolution of Calc-Alkali Magmas in the Okhotsk-Chukotka Volcanogenic Belt, *Petrology*. 19 (3), 249–290. DOI: 10.1134/S0869591111020020 [In Russian].
- Akinin, V. V., Miller, E. L., Toro, J., Prokopiev, A. V., Gottlieb, E. S., Pearcey, S., Polzunenkov, G. O., Trunilina, V. A., 2020. Episodicity and the Dance of Late Mesozoic Magmatism and Deformation Along the Northern Circum-Pacific Margin: North-Eastern Russia to the Cordillera, *Earth-Science Reviews*. 208103272, 1–25.
- Akinin, V. V., Polzunenkov, G. O., Gottlieb, E. S., Miller, E. L., 2022. Cretaceous Monzonite-Granite-Migmatite Velitkenay Complex: Petrology, Geochemistry of Rocks and Zircon (U–Pb, Hf, and O) Applied to the Reconstruction of the Magmatism and Continental Crust Evolution in the Arctic Alaska – Chukotka Block, *Petrology*. 30 (3), 227–259. DOI: 10.31857/S0869590322030025 [In Russian].
- Amato, J. M., Toro, J., Akinin, V. V., Hampton, B. A., Salnikov, A. S., Tuchkova, M. I., 2015. Tectonic Evolution of the Mesozoic South Anyui Suture Zone, Eastern Russia: A Critical Component of Paleogeographic Reconstructions of the Arctic Region, *Geosphere*. 11 (5), 1530–1564.
- Antipin, V. S., Kovalenko, A. I., Ryabchikov, I. D., 1994. Rare Elements Distribution Coefficients in Igneous Rocks. Moscow, Nauka [In Russian].
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters, *Chemical Geology*. 48, 43–55. DOI: 10.1016/0009-2541(85)90034-8.
- Bely, V. F., 1978. Formations and Tectonics of the Okhotsk-Chukotka Volcanogenic Belt. Moscow, Nauka [In Russian].
- Bely, V. F., 1994. Geology of the Okhotsk-Chukotka Volcanogenic Belt. Magadan, NEISRI FEB RAS [In Russian].
- Berlimble, D. G., Gorodinsky, M. E., Kotlyar, I. N., 1975. Cretaceous Intrusive Magmatism of the Anyuy-Oloy Block, *Magmatism in Northeast Asia. Proceedings of the First North-East Petrographic Meeting. Part 2. Igneous Complexes*. Ed. E. T. Shatalov. Magadan, Book Publ., 52–54 [In Russian].
- Berlimble, D. G., Kalnynya, V. A., 1971. Gold Mineralization Connection with Igneous Complexes of the In-nakh Gold Mining Region. Report on Topic 14. Bilibino. 615 [In Russian].
- Best, M. G., Christiansen, E. H., 2001. Igneous Petrology. Oxford, Blackwell Science.
- Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of Rare Earth Elements: Meteorite Studies, *Rare Earth Element Geochemistry*. Ed. P. Henderson. New York, Elsevier, 63–114. DOI: 10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3.
- Chitalin, A. F., Nikolayev, Yu. N., Baksheyev, I. A., Prokofiev, V. Yu., Fomichov, E. V., Usenko, V. V., Nagornaya, E. V., Marushchenko, L. I., Sidorina, Yu. N., Dzhezheya, G. T., 2016. Porphyry-Epithermal Systems of the Baim Ore Zone, Western Chukotka, *Smirnovsky Collection-2016. Problems of Mineralogy, Economic Geology, and Mineral Resources. Part I. Problems of Mineralogy, Economic and Ecological Geology, Mineralogical Museum Work, and Deep Mineralogy*. Ed. V. I. Starostin. Moscow, MAKS-Press, 82–115 [In Russian].
- Decisions of the Third Interdepartmental Regional Stratigraphic Meeting on the Precambrian, Paleozoic, and Mesozoic of Russia's North-East. Eds. T. N. Koren, G. V. Kotlyar. St. Petersburg, VSEGEI, 2009 [In Russian].
- Frolova, T. I., Burikova, I. A., 1997. Magmatic Formations of Modern Geotectonic Settings. Moscow, Moscow State University [In Russian].
- Furman, O. A., 1999. Legend of the Oloy Sheet Series of the Russian Federation State Geological Map, Scale 1 : 200,000. Bilibino, Anyuy Federal Geology and Mining Enterprise [In Russian].
- Grigoryev, N. A., 2009. Chemical Elements Distribution in the Upper Part of the Continental Crust. Yekaterinburg, UrB RAS [In Russian].
- Gusev, G. S., Mezhelevsky, N. V., Morozov, A. F., Kilipko, V. A., 2001. Tectonic Zoning Scheme of Russia Territory. Scale 1 : 5,000,000. Explanatory Note. Moscow, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, IMGRE, GEOKART [In Russian].
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks, *Canadian Journal of Earth Sciences*. 8 (5), 523–548. DOI: 10.1139/e71-055.
- Isayeva, E. P., Zvizda, T. V., Lazareva, E. I., Mazurkevich, K. N., Paderin, G. P., 2019. State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1 : 1,000,000. Third Generation. Chukotka Series. Sheet Q-58 – Aliskerovo. Explanatory Letter. Ministry of Natural Resources of Russia, Rosnedra, VSEGEI, Georegion JSC. St. Petersburg, VSEGEI [In Russian].
- Kara, T. V., 2018. New Data on the Age of Igneous Complexes of the Alazey-Oloy Fold System (Western Chukotka), *Pacific Geology*. 37 (6), 107–115 [In Russian].
- Kara, T. V., Tikhomirov, P. L., Dyomin, A. D., 2019. New Data on the Age of Magmatic Events in the Oloy Folded Zone, Western Chukotka (Based on the Results of Zircons U–Pb Dating), *RAS Reports*, 489 (2), 161–165 [In Russian].
- Kastamonu Area, Northern Turkey, 1976, *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 58 (1), 63–81.
- Komarova, Ya. S., Kostitsyn, Yu. A., Nikolayev, Yu. N., 2013. Rb–Sr Age of Asket Diorite-Porphyry from the Mangazeya Intrusive Complex, Central Chukotka, *Abstracts of the 9th International School of Geosciences n. a. L. L. Perchuk*. Odessa, Odessa I. I. Mechnikov National University, 79–83 [In Russian].
- Kotova, M. S., Nagornaya, E. V., Anosova, M. O., Kostitsyn, Yu. A., Baksheyev, I. A., Nikolayev, Yu. N., Kaliko, I. A., 2012. Dating of the Metasomatic Process and Ore-Bearing Granitoids of the Porphyry Copper Deposits in the Nakhodka Ore Field (Western Chukotka), *Materials of the 5th Russia Conference on Isotope Geochronology*. Moscow, IGM RAS, 181–184 [In Russian].
- Kuznetsov, V. M., Gavrish, A. V., Shvedov, S. D., Zheleboglo, O. V., Bondarenko, S. A., Gusev, E. A., Vopilovskaya, O. A., Ivanova, V. V., Razuvayeva, E. I., Suprunenko, O. I., Usov, A. N., Alekseyev, D. I., Belikova, O. A., Shpikerman, E. V., 2022. State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1 : 1,000,000. Third Generation. Verkhoyansk-Kolyma Series. Sheet Q-57 – Omolon. Explanatory Letter. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Rosnedra, VSEGEI. St. Petersburg, VSEGEI [In Russian].
- Luchitskaya, M. V., Kara, T. V., Katkov, S. M., 2018. New Data on the Age of the Nichan Massif in the Oloy Volcanic Belt (Western Chukotka), *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series*. 93 (2), 27–33 [In Russian].
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, USA, Berkeley Geochronology Center Special Publication.

- Maeda, J., 1990. Opening of the Kuril Basin Deduced from the Magmatic History of Central Hokkaido, North Japan, *Tectonophysics*. 74, 235–255.
- Masaitis, V. L., Moskaleva, V. N., Rumyantseva, N. A., Alexandrova, S. V., Belyaev, G. M., Bluman, B. A., Bykovskaya, E. V., Verkhalo-Uzsky, V. N., Goretskaya, E. N., Demidova, T. Ya., Kangur, M. A., Leskov, S. A., Moshkin, V. N., Nikolskaya, V. P., Orlova, M. P., Ostroumova, V. S., Pavlova, V. P., Reshetova, S. A., Rotman, V. K., Stankevich, E. K., Tolmacheva, E. V., Trofimov, V. A., Tsenter, I. Ya., Sharpenok, L. N., Shnay, G. K., 1979. Magmatic Formations in the USSR. Leningrad, Nedra, 2 [In Russian].
- Merzlyakov, V. M., Terekhov, M. I., Lychagin, P. P., Dylevsky, E. F., 1982. Omolon Massif Tectonics, *Geotectonics*. 1, 74–85 [In Russian].
- Milov, A. P., 1984. Late Mesozoic Granitoid Formations in Central Chukotka. Novosibirsk, Nauka [In Russian].
- Parfenov, L. M., 1984. Continental Margins and Island Arcs in the Northeast Asia Mesozoids. Novosibirsk, Nauka [In Russian].
- Parfenov, L. M., 1991. Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoid in the Plate Tectonics Context, *Tectonophysics*. 199, 319–342 [In Russian].
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks, *Journal of Petrology*. 25, 956–983. DOI: 10.1093/petrology/25.4.956.
- 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.
- Rusakov, I. M., Vinogradov, V. A., 1969. Eugeosynclinal and Miogeosynclinal Regions in the USSR's North-East, *Uchyoniye Zapiski NIIGA, Regionalnaya Geologiya*. Leningrad, 15, 5–27 [In Russian].
- Shand, S. J., 1943. Eruptive Rocks: Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore Deposits with a Chapter on Meteorites. New York, John Wiley & Sons.
- Sharpenok, L. N., Kostin, A. E., Kukharensko, E. A., 2013. Sum of Alkalis – Silica TAS Diagram for Plutonic Rocks Chemical Classification and Diagnosis, *Regional Geology and Metallogeny*. 56, 40–50 [In Russian].
- Shatova, N. V., Seryogin, S. V., 2022. New Isotopic Data for Rocks of the Namyndykan and Victorian Complexes as an Indicator of Their Belonging to the Volcanic Belts in the North-East, *Geology in the Continent Margin. Materials of the 2nd Youth Scientific Conference-School FEGIFEB RAS*. Vladivostok, FEFU, 34–39. 1 CD-ROM, DOI: 10.24866/7444-5330-5 [In Russian].
- Shilo, N. A., Gelman, M. L., Merzlyakov, V. M., Terekhov, M. I., Tilman, S. M., 1973. The Alazeya-Oloy Eugeosynclinal System is a New Mesozoid Element of the USSR's North-East, *AS USSR Reports*. 210 (5), 1174–1177 [In Russian].
- Sokolov, S. D., 2010. Essay on the Tectonics of North-east Asia, *Geotectonics*. 6, 60–78 [In Russian].
- Sokolov, S. D., Bondarenko, G. E., Morozov, O. L., Ganelin, A. V., Podgornyy, I. I., 2001. Cover Tectonics of the South Anyuy Suture (Western Chukotka), *RAS Papers*. 376 (1), 80–84 [In Russian].
- Sokolov, S. D., Didenko, A. P., Grigoryev, V. N., Aleksyutin, M. V., Bondarenko, G. E., Krylov, K. A., 1997. Paleontological Reconstructions of the North-East of Russia: Problems and Uncertainties, *Geotectonics*. 6, 72–90 [In Russian].
- Sokolov, S. D., Tuchkova, M. I., Ganelin, A. V., Bondarenko, G. E., Leyer, P., 2015. Tectonics of the South Anyuy Suture (North-East of Asia), *Geotectonics*. 1, 5–30 [In Russian].
- Sokolov, S. D., Tuchkova, M. I., Ledneva, G. V., Luchitskaya, M. V., Ganelin, A. V., Vatrushkina, E. V., Moiseyev, A. V., 2021. Tectonic Position of the South Anyuy Suture, *Geotectonics*. 5, 51–73 [In Russian].
- Starikova, E. V., Gagieva, A. M., Konovalov, A. L., Vatrushkina, E. V., Akinin, V. V., 2023. Upper Jurassic – Early Cretaceous Deposits in the Eastern Part of the Oloy Zone: Stratigraphy, Geochemistry, Age, and Geodynamic Conditions of Formation, *Russian Journal of Pacific Geology*. 4, 3–29 [In Russian].
- Starikova, E. V., Konovalov, A. L., Cherkashin, A. V., Neklyudov, G. A., Matyushkov, A. D., Gagieva, A. M., Sorokina, Yu. P., Petrov, V. V., Chuiko, M. A., 2023. State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1 : 200,000. Second Edition. Anadyr Series. Sheet Q-58-XXI, XXII (Chernaya). Explanatory Letter. Ministry of Natural Resources of Russia, Rosnedra, VSEGEI. St. Petersburg, VSEGEI [In Russian].
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes, *Magmatism in the Ocean Basins. Special Publications*. Eds. A. D. Saunders, M. J. Norry. London, Geological Society, 42, 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.
- Tikhomirov, P. L., 2020. Cretaceous Continental-Margin Magmatism in Northeast Asia and Issues in the Genesis of the Largest Phanerozoic Provinces with Silicic Volcanism. Moscow, GEOS [In Russian].
- Tikhomirov, P. L., Kalinina, E. A., Kobayashi, K., Nakamura, E., 2008. Late Mesozoic Silicic Magmatism of the North Chukotka Area (NE Russia): Age, Magma Sources, and Geodynamic Implications, *Lithos*. 105, 329–346.
- Tikhomirov, P. L., Luchitskaya, M. V., Prokofiev, Yu. V., Akinin, V. V., Miller, E. L., Isaeva, E. P., Palechek, T. N., Starikova, E. V., Boldyreva, A. I., Wiegand, B., 2023. Evolution of Aptian and Albian Magmatism of Western and Northern Chukotka (Northeast Russia) Based on Zircon U–Pb Geochronology and Rock Geochemistry, *International Geology Review*. 66 (2), 607–632. DOI: 10.1080/00206814.2023.2205494.
- Tikhomirov, P. L., Prokofyev, V. Yu., Kalko, I. A., Apletalin, A. V., Nikolayev, Yu. N., Kobayashi, K., Nakamura, E., 2017. Post-Collisional Magmatism in Western Chukotka and Early Cretaceous Tectonic Restructuring of Northeast Asia, *Geotectonics*. 2, 32–54 [In Russian].
- Voronets, L. L., Vyatkin, B. V., 2002. Legend of the Anadyr Series of Sheets of the State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1 : 200,000. Anadyr [In Russian].
- Williams, I. S., 1998. U–Th–Pb Geochronology by Ion Microprobe, *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology*. Eds. M. A. McKibben, W. C. Shanks III, W. I. Ridley. 7, 1–35.
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach. London, Unwin Hyman. DOI: 10.1007/978-1-4020-6788-4.
- Zindler, A., Hart, S. R., 1986. Chemical Geodynamics, *Annual Review of Earth and Planetary Science Letters*. 14, 493–571. DOI: 10.1146/annurev.earth.14.050186.002425.