

## Меловой вулканизм Хара-Сисского поля (Верхояно-Колымская орогенная область)

В.А. Трунилина, С.П. Роев

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия  
v.a.trunilina@diamond.ysn.ru, sproev@mail.ru*

**Аннотация.** Впервые детально охарактеризованы петрография, петрохимические и геохимические особенности меловых вулкаников наименее изученного на северо-востоке Верхояно-Колымской орогенной области Хара-Сисского вулканогенного поля, входящего в состав Индигирского пояса растяжения земной коры. Вулканогенная толща разделена на две подтолщи – ранне- и позднемеловую. В составе раннемеловых вулкаников преобладают дациты и риолиты нормальной щелочности. Позднемеловые вулканики представлены в основном трахиандезитами и трахиандезибазальтами. Показано, что вулканическая деятельность началась в обстановке активной континентальной окраины, а завершилась в обстановке внутриплитного континентального рифтогенеза со сменой существенно коровых образований раннего мела позднемеловыми производными мантийных магм, исходные расплавы которых генерировались во все более глубоких горизонтах метасоматизированной мантии. Соответственно, в процессе эволюции вулканизма породы высококальциевой позднеорогенной серии сменялись производными латитовой и трахитовой серий, а завершающие магматическую деятельность в пределах рассматриваемой территории щелочные лампрофиры принадлежат к щелочно-базальтовой серии. Установлены повышенные концентрации во всех позднемеловых вулканиках Rb, Th, U, REE, F, Cl, P, что объясняется функционированием горячей точки и поступлением на уровни магмогенерации потока флюидов, связанных с очагами щелочно-базальтоидного состава. Геохимическая специализация всех позднемеловых вулкаников на Au и кристаллизация в условиях высокой – до аномально высокой активности хлора позволяют ожидать генерацию золоторудных проявлений в процессе формирования вулканогенной толщи.

**Ключевые слова:** вулканизм, геодинамическая обстановка, горячая точка, магмогенерация, геохимическая специализация.

**Благодарности.** Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект 0381-2016-0001).

## Cretaceous volcanism of the Khara-Siss field (Verkhoyansk-Kolyma orogenic area)

V.A. Trunilina, S.P. Roev

*Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of sciences, Yakutsk, Russia  
v.a.trunilina@diamond.ysn.ru, sproev@mail.ru*

**Abstract.** Petrography, petrochemical and geochemical features of the Cretaceous volcanic rocks of the least studied Khara-Siss volcanogenic field, located in the North-east of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic area, within the Indigirka extensional belt, are studied in the article for the first time. The volcanogenic stratum is divided into two masses – Early and Late Cretaceous. Dacites and rhyolites having normal alkalinity dominate in the composition of the early Cretaceous volcanic rocks. Late Cretaceous volcanic rocks are represented mainly by trachyandesites and trachyandesites. It is shown that volcanic activity began under the conditions of the active continental margin, and completed under the conditions of intraplate continental riftogenesis with the replacement of crust Early Cretaceous formations by the Late Cretaceous derivatives of mantle magmas, the primary melts of which were formed in deeper horizons of metasoma-

*tized mantle. Accordingly, the rocks of high-potassium late-orogenic series were replaced by the derivatives of latite and trachyte series during volcanism evolution, and alkaline lamprophyres completing magmatic activity within the studied area, belong to alkaline-basalt series. Increased concentrations of Rb, Th, U, REE, F, Cl, P in all Late Cretaceous volcanic rocks, that is explained by functioning of hot point and supply of the flow of fluids, related to the magmatic hearths of alkaline-basaltoid composition, to magma generation levels. The geochemical specialization of all the Late Cretaceous volcanic rocks in Au and crystallization under the conditions of high – up to abnormal high activity of chlorine, allows expecting the generation of gold occurrences during the formation of volcanogenic rocks.*

**Key words:** volcanism, geodynamic setting, hot point, magma generation, geochemical specialization.

**Acknowledgements.** The study was carried out according to the plan of research and development work of Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (project 0381-2016-0001).

### Введение

В пределах Верхояно-Колымской орогенной области в субмеридиональном направлении от Охотского моря на юге до моря Лаптевых на севере протягивается цепь линейных вулканоплутонических зон, сложенных вулканическими и субвулканическими образованиями апт-поздне-мелового возраста. А.П. Ставским [1] эта полоса выходов выделена как апт-раннепалеогеновый Нижне-Индибирский внутриконтинентальный рифтовый пояс, Л.М. Натаповым и Е.П. Сурмиловой [2] – как Джахтардах-Олойский пояс сформированной в предальбское время активной окраины Сибирского континента, В.А. Трунилиной и Л.М. Парфеновым [3] как апт-позднемеловой Индибирский пояс растяжения земной коры. С магматическими образованиями пояса ассоциируют проявления Au, Ag, Sn, REE. В северной части пояса на рубеже раннего и позднего мела была сформирована Джахтардахская наложенная впадина, включающая одноименное вулканогенное поле на западе и Хара-Сисское – на востоке. Магматизм первого достаточно детально изучен [4, 5], а весьма ограниченные сведения о вулканогенных породах второго отражены только в работе И.Я. Некрасова [6] и отчетах по геологической съемке [7]. В пределах Джахтардахского поля известны рудопроявления золота и олова. Геохимическая специфика вулкаников Хара-Сисского поля неизвестна.

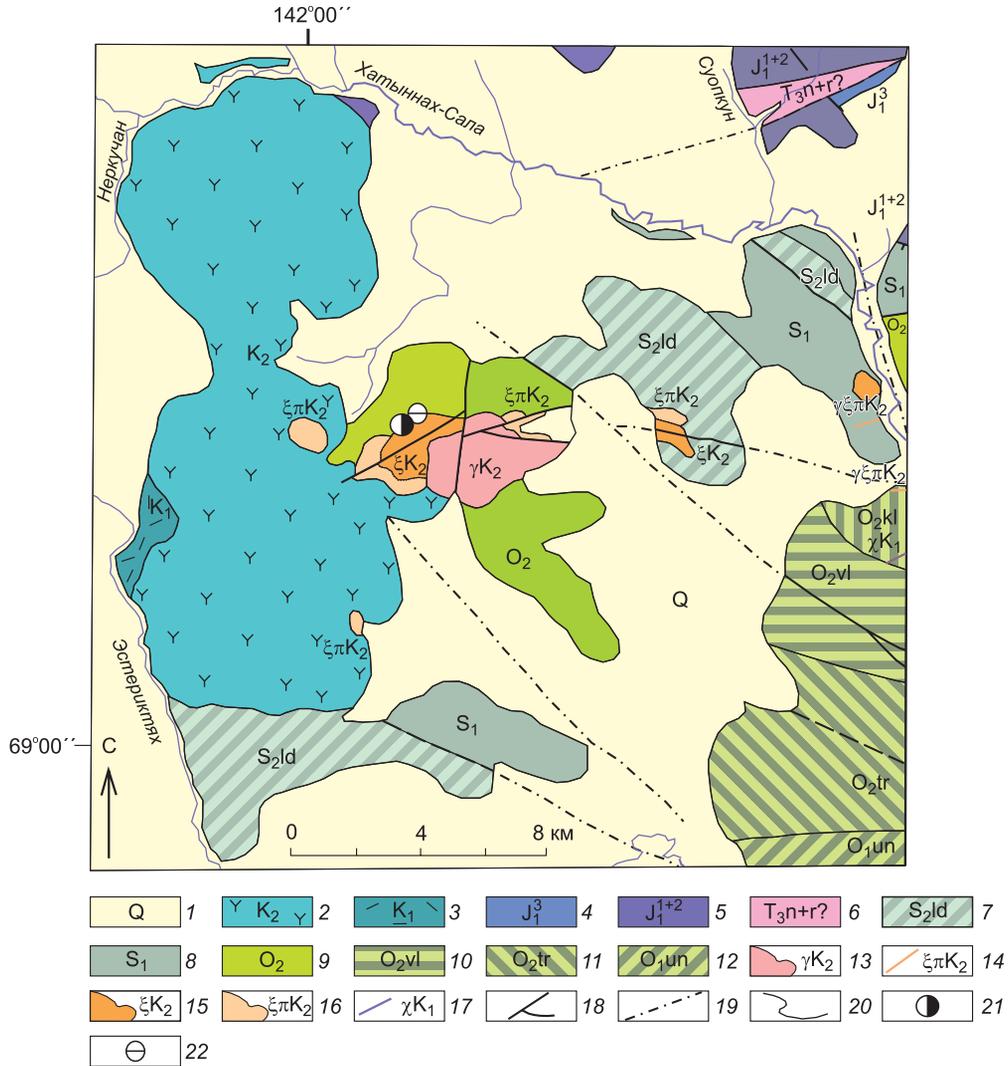
Авторы полагают, что изложенные в статье материалы будут востребованы при составлении листов Геологической карты РФ нового поколения.

### Геологическое строение территории

В пределах Хара-Сисского поля вулканогенная толща с угловым несогласием залегает на интенсивно дислоцированных палеозойских терригенно-карбонатных и кремнисто-вулканогенных образованиях и интродуцирована Хара-

Сисским массивом монцонит-сиенит-гранитного состава и редкими дайками щелочных трахитов и щелочных лампрофиров, пересекающих как вулканики, так и породы массива (рис. 1). Изотопный K–Ar возраст сиенитов и монцонитов массива 90–100 млн лет; изохронный Rb–Sr возраст гранитов массива –  $94 \pm 1$  млн лет, K–Ar возраст секущих даек 78 млн лет. В гальке песчаников и алевролитов из конгломератов, залегающих в основании близкой по составу толщи Джахтардахского поля, определены остатки раннемеловой флоры. Изотопный Rb–Sr возраст вулкаников низов разреза джахтардахской толщи соответствует баррем-аптскому времени: 131 млн лет для базальтов и 123 млн лет для трахиандезитов; изотопный K–Ar возраст двупироксен-биотитовых латитов верхней части разреза – 92 млн лет (сеноман), K–Ar возраст секущих даек – 68–79 млн лет [5].

Обнаженность в пределах Хара-Сисского поля крайне скудная, коренные выходы пород отсутствуют, породы преимущественно превращены в мелкую щебенку, что не позволяет составить детальный стратиграфический разрез вулканогенной толщи, а также осложняет отбор и обработку минералогических проб. По составу вулканогенная толща может быть подразделена на две подтолщи суммарной мощностью 80–120 м. Нижняя, условно раннемеловая, сложена андезитами и андезидацитами (30–40 м), выше сменяющимися риодацитами и риолитами. Венчается она горизонтом кластолав кислого состава (5–7 м). В верхней, позднемеловой подтолще (50–60 м) преобладают трахиандезиты (латиты), чередующиеся с маломощными (первые метры) потоками трахиандезибазальтов и трахидацитов. У подножия г. Хара-Сис встречены единичные обломки щелочных пикритов, положение которых неясно.



**Рис. 1.** Геологическая карта северо-восточной части Селенняхского антиклинория [7].

1 – четвертичные отложения (Q); 2 – верхний мел: трахибазальты, трахиандезитбазальты, трахиандезидациты, трахиты, риолиты (K<sub>2</sub>); 3 – нижний мел: дациты, риолиты (K<sub>1</sub>); 4 – нижняя юра, верхняя часть: аргиллиты и алевролиты с редкими прослоями песчаников (J<sub>1</sub><sup>3</sup>); 5 – нижняя юра, нижняя и средняя части: песчаники, алевролиты и аргиллиты с редкими пластами известняков (J<sub>1</sub><sup>1+2</sup>); 6 – нижний триас, норийский и рэтский (?) ярусы: песчаники, алевролиты и аргиллиты (T<sub>3n+r?</sub>); 7 – верхний силур, лудловский ярус: известняки, доломитизированные и алевролиты известняки, доломиты, алевроито-известковистые сланцы (S<sub>2ld</sub>); 8 – нижний силур: известняки, алевролиты и кремнеземные известняки, известково-глинистые и алевроито-известковистые сланцы (S<sub>1</sub>); 9 – средний ордовик, нерасчлененные отложения: известняки, глинистые и алевролиты известняки, известково-глинистые, глинистые и глинисто-хлоритовые сланцы (O<sub>2</sub>); 10 – средний ордовик, волчинская свита: известняки, глинистые и доломитизированные известняки, глинистые, известково-глинистые и глинисто-хлоритовые сланцы (O<sub>2vl</sub>); 11 – средний ордовик, тарын-юряхская свита: известняки, глинистые известняки, глинистые, известково-глинистые и глинисто-хлоритовые сланцы (O<sub>2tr</sub>); 12 – нижний ордовик, унгинская свита: хлорит-известковистые, кварц-серицитовые сланцы, известняки (O<sub>1un</sub>); 13 – позднемерловы граниты (γK<sub>2</sub>); 14 – позднемерловы дайки сиенит-порфиров (ξπK<sub>2</sub>), кварцевых сиенит-порфиров (qξπK<sub>2</sub>), граносиенит-порфиров (gξπK<sub>2</sub>); 15 – позднемерловы тела сиенитов (ξK<sub>2</sub>), кварцевых сиенитодиоритов (qξK<sub>2</sub>); 16 – позднемерловы тела сиенит-порфиров (ξπK<sub>2</sub>), кварцевых сиенит-порфиров (qξπK<sub>2</sub>), граносиенит-порфиров (ξπK<sub>2</sub>); 17 – раннемерловы дайки лампрофиров (χK<sub>1</sub>); 18 – тектонические нарушения; 19 – то же, предполагаемые; 20 – геологические границы, 21 – фациальные границы, 22 – рудопоявление золота; 23 – олово-вольфрамовое рудопоявление.

**Fig. 1.** Geological map of the North-Eastern part of the Selennyakh anticlinorium [7].

1 – Quaternary deposits (Q); 2 – upper Cretaceous: trachybasalts, trachyandesite, trachyandesite, trachytes and rhyolites (K<sub>2</sub>); 3 – lower Cretaceous: dacites, rhyolites (K<sub>1</sub>); 4 – lower Jurassic, upper part: argillite and siltstone with rare Sandstone interlayers (J<sub>1</sub><sup>3</sup>); 5 – lower Jurassic, lower and middle part: sandstones, siltstones and mudstones with rare layers of limestone (J<sub>1</sub><sup>1+2</sup>); 6 – lower Triassic, Norian and Rhaetian (?) stages: sandstones, siltstones and mudstones (T<sub>3n+r?</sub>); 7 – upper Silurian, Ludlowian stage: limestone, dolomitized and

siltstone limestone, dolomite, aleurite-calcareous shales ( $S_2d$ ); 8 – lower Silurian: limestone, aleuritic and silicified limestone, calcareous clayey and aleurite-calcareous shales ( $S_1$ ); 9 – middle Ordovician, undifferentiated sediments: limestones, clay and aleuritic limestone, calcareous-clayey, clayey and clayey-limestones and shales ( $O_2$ ); 10 – middle Ordovician volchinskaya stage: limestone, clayey and dolomitized limestone, clayey, chalky-clay and clay-chlorite schist ( $O_2v$ ); 11 – middle Ordovician, Taryn-yuryakhskoye stage: limestone, clayey limestone, clayey, lime-clay and clay-chlorite schist ( $O_2tr$ ); 12 – lower Ordovician unginginskaya stage: the chlorite-calcareous, quartz-chlorite-calcareous, sericite-chlorite, sericite-calcareous, quartz-sericite schist, limestone ( $O_{1un}$ ); 13 – late Cretaceous granites ( $\gamma K_2$ ); 14 – late Cretaceous dikes of syenite-porphyry ( $\xi\pi K_2$ ), quartz syenite porphyry ( $q\xi\pi K_2$ ), granosyenite porphyry ( $g\xi\pi K_2$ ); 15 – late Cretaceous syenite body ( $\xi K_2$ ), syenite quartz-diorites ( $q\xi K_2$ ); 16 – late Cretaceous bodies of syenite porphyry ( $\xi\pi K_2$ ), quartz syenite porphyry ( $q\xi\pi K_2$ ), granosyenite porphyry ( $g\xi\pi K_2$ ); 17 – early Cretaceous dikes of lamprophyres ( $\chi K_1$ ); 18 – tectonic faults; 19 – the same, assumed; 20 – geological boundaries, 21 – facies boundaries; 22 – ore occurrences of gold; 23 – tin-tungsten ore occurrences.

**Петрография.** Риолит- и дацит-порфиры массивные или с неотчетливо выраженной флюидальностью, с мелкими ( $n$  мм) миндалинами зонального кальцита. Породы порфиновые и сериально-порфиновые с вкрапленниками амфибола, по которому развиты полные псевдоморфозы карбоната и гидроокислов железа; интенсивно ожелезненного биотита и альбитизированного незонального олигоклаза. В риолит-порфирах к ним присоединяются кварц и слабо пелитизированный санидин. Основная масса микропиклитовая или фельзитовая, с редкими микролитами полевых шпатов и единичными чешуйками биотита.

В средней части нижней подтолщи отмечен горизонт кластолав мощностью 5–7 м, сложенный сваренными, нечетких очертаний обломками сферолоидного и фельзитового риолитов (рис. 2, а). Основная масса первых состоит из частично перекристаллизованных сферолоидов размерами 0,05–0,15 мм, представляющих собой тонкий агрегат микрозерен и волокон кварца и альбита, включающий по центру таблички санидина и столбчатые кристаллы апатита; во вторых основная масса фельзитовая, с редкими микролитами полевых шпатов и биотита. Вкрапленники в обоих случаях представлены кварцем, опацитизированным биотитом, олигоклазом и более мелкими зернами кварца.

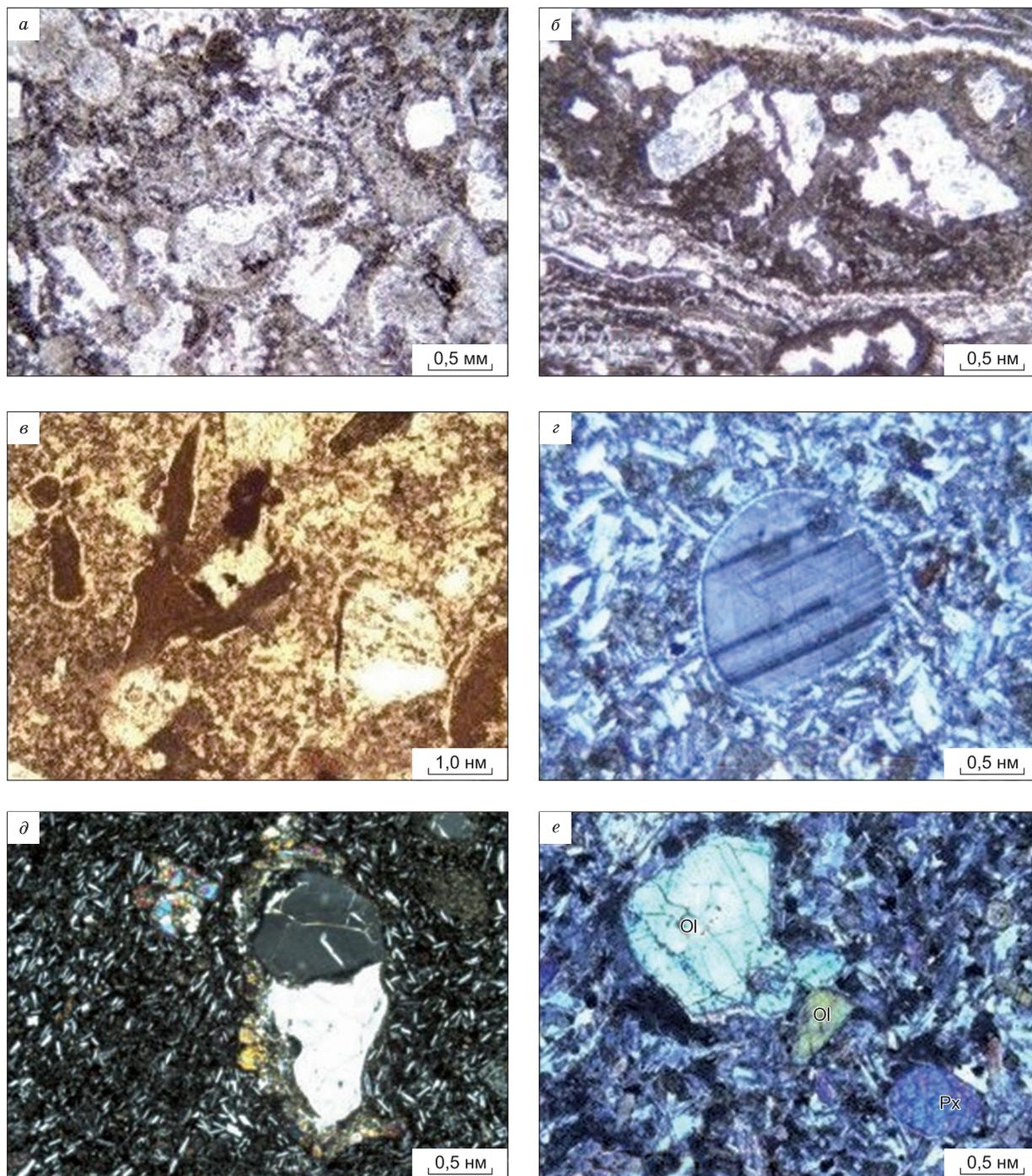
*Андезиты и андезибазальты* сериально-порфиновые и порфиновые, с плоскостной ориентировкой вкрапленников в гиалопилитовом матриксе, содержащем тонкие лейсты плагиоклаза. Вкрапленники представлены замещенным псевдоморфозами каннилоита амфиболом, опацитизированным или нацело замещенным гидроокислами железа биотитом и многозональным андезин-лабрадором (60–50 % an).

Венчающие разрез нижней подтолщи кластолавы риолитового состава образуют горизонт мощностью 15–20 м. Текстура пород эвтакси-

товая, псевдофлюидальная, обусловленная чередованием прослоев и участков в разной степени раскристаллизованного кислого стекла. Структуры таких полос и участков гиалопилитовые, микропиклитовые, сферолоидные. Вкрапленники однотипны: карбонатизированный трещиноватый олигоклаз и олигоклаз-альбит, санидин, опацитизированный и хлоритизированный биотит, мелкие вкрапленники кварца. Скопления крупных зерен кварца выполняют полости (разрывы), образовавшиеся в текущей лаве вследствие ее высокой вязкости (рис. 2, б). Породы пересекают кварцевые и кварц-кальцитовые прожилки.

Реже здесь встречаются обломки туфолов из полуугловатых или сглаженных очертаний обломков разного состава, погруженных в пепловую массу. Среди обломков присутствуют: гиалопилитовый андезит с выделениями клинопироксена и лейстами плагиоклаза в разломленном стекле среднего состава; псевдосферолитовый риолит; фьямме с единичными чешуйками биотита; микроаллотриоморфно-зернистый микрогранит-порфир; обломки зерен катаклазированного, интенсивно альбитизированного и серицитизированного плагиоклаза, превращенного в шахматный альбит калишпата, кварца. В туфоловах найдены многочисленные обугленные остатки листьев и стеблей папоротников (рис. 2, в).

*Трахиандезибазальты* (латиты) верхней подтолщи порфиновые и сериально-порфиновые, с микроделеритовой, реже гиалопилитовой или пилотакситовой основной массой. В порфировых выделениях присутствуют плагиоклаз, клино- и ортопироксены, реже – оливин и биотит. Наиболее крупные выделения представлены плагиоклазом и оливином. Плагиоклаз первой генерации наблюдается в овальной формы единичных вкрапленниках (рис. 2, г) и в оплавленных, иногда резорбированных на фрагменты ядрах плагиоклаза второй генерации и по составу отвечает анортиту



**Рис. 2.** Текстурно-структурные особенности вулканических пород Хара-Сисского поля.  
*a* – сферолоидная структура риолита. Шлиф 17-8. Николи +; *б* – кластолава риолитов. Шлиф 19-1. Николи +; *в* – обугленные остатки листьев папоротника в туфлаве кислого состава. Шлиф 18-1. Николи параллельны; *г* – реститовое зерно анортита в трахиандезибазальте. Шлиф 2390-5. Николи +; *д* – ксенокристаллы кварца в трахиандезите. Шлиф 19-3. Николи +; *е* – вкрапленники оливина (Ol) и клинопироксена (Px) в щелочном лампрофире. Шлиф 17-1. Николи +.

**Fig. 2.** Textural-structural features of the Khara-Siss field volcanic rocks.  
*a* – Spheruloid structure of rhyolite. Thin section 17-8. Nicols +; *б* – Clastic lava of rhyolites. Thin section 19-1. Nicols +; *в* – Carbonized remains of fern leaves on tufflava of acid composition. Thin section 18-1. Nicols are parallel; *г* – Restite grain of anorthite in trachyandesibasalt. Thin section 2390-5. Nicols +; *д* – Xenocrysts of quartz in trachyandesite. Thin section 19-3. Nicols +; *е* – Phenocrysts of olivine (Ol) and clinopyroxene (Px) in alkaline lamprophyre. Thin section 17-1. Nicols +.

с 97 % ап. Характерны интенсивный катаклаз зерен и пересекающиеся системы полисинтетических двойников, что говорит о неоднократной перекристаллизации. Плагиоклаз второй генерации – зональный лабрадор с центральной зоной состава  $an\ 57\ an\ 40\ ort\ 3$  и с наложенной прожилково-пятнистой альбитизацией. Тонкая полоска вдоль границы оплавленного ядра и следующей зоны насыщена микрочешуйками светлой слюды и иголочками апатита, что указывает на сброс летучих в промежуточной камере. В гломеровых скоплениях наблюдаются сростки табличек плагиоклаза и коротких призм ортопироксена (энстатита) равной степени идиоморфизма, а также срастания кристаллов энстатита и магнезиального авгита ( $wo\ 33,7\ en\ 37,1\ fs\ 11,6\ 22,2$ ), также равной степени идиоморфизма.

Расчетные параметры кристаллизации клинопироксена [8]:  $T = 1182\text{--}1153\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 0,8\text{ ГПа}$ . По соотношению железистости ( $f = 36,8\text{--}57,5\%$ ) и содержаний  $TiO_2$  ( $0,21\text{--}1,02\%$ ) он соответствует клинопироксенам пород континентальных базальтоидов [9]. По клинопироксену развиваются магнезиальная роговая обманка или каннилоит. Роговая обманка состава (мас. %):  $SiO_2\ 48,81\text{--}49,88$ ,  $TiO_2\ 1,63\text{--}1,02$ ,  $Al_2O_3\ 4,2\text{--}2,44$ ,  $Cr_2O_3\ 0,16\text{--}0,09$ ,  $Fe_2O_3\ 10,14\text{--}11,81$ ,  $FeO$  не обн.,  $MnO\ 0,11\text{--}0,22$ ,  $MgO\ 14,80\text{--}15,60$ ,  $CaO\ 17,11\text{--}16,56$ ,  $Na_2O\ 0,34\text{--}0,17$ ,  $K_2O\ 0,08\text{--}0,11$ ,  $Cl\ 0\text{--}0,02$ ,  $F\ 0,27\text{--}0,16$ ,  $f = 40,7\text{--}43,1$ , кристаллизовалась в близповерхностных условиях при  $877\text{--}812\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при высокой активности кислорода ( $-\log f\ O_2 = 12$ ) и содержании воды в расплаве  $5,3\%$  (расчеты по [10]). Биотит во вкрапленниках наиболее поздний, корродирует пироксены и амфибол. Представлен магнезиальной, богатой галогенами модификацией ( $f = 44,9\%$ ,  $F = 0,61\%$ ,  $Cl = 0,42\%$ ). Образовался также в окислительных условиях и при давлении не более  $0,15\text{ ГПа}$  (табл. 1). Расчетная [11] температура  $772\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кристаллизация шла при содержании воды в расплаве  $3\%$ , что подтверждает сброс летучих в процессе подъема расплава к поверхности. Единичные автолиты размерами до  $1,5\text{ мм}$  имеют состав оливин-двупироксенового габбро и сложены таблитчато-зернистым агрегатом оливина, орто- и клинопироксена и интенсивно сосюритизированного лабрадора в простых двойниках. До  $10\%$  объема автолита составляет рудный, приближая структуру к сидеронитовой. Основная масса в большинстве случаев сложена лейстами (иногда с плоскостной ориентировкой, оги-

бающей вкрапленники) или микропризмочками плагиоклаза в простых и полисинтетических двойниках, промежутки между которыми заполнены разложенным стеклом с микрочешуйками биотита, гнездами хлорита и сыпью рудного. И вкрапленники, и основная масса густо насыщены апатитом.

Акцессорные минералы трахиандезитобазальтов представлены цирконом с варьирующими от  $71$  в центре до  $26$  по периферии отношениями  $ZrO_2/HfO_2$ . Циркон обычно беден элементами-примесями, но наряду с ними встречаются метамиктные зерна, интенсивно обогащенные  $UO_2$  ( $5,27\text{--}5,32\%$ ),  $Y_2O_3$  ( $2,78\text{--}2,8$ ),  $ThO_2$  ( $0,92\text{--}0,97$ ),  $Yb_2O_3$  ( $0,71\text{--}0,76\%$ ), с величиной отношения  $ZrO_2/HfO_2$ , снижающейся до  $5$ . Апатит представлен в основном F-апатитом, с содержанием Cl-апатитового минала  $12\text{--}17\%$  и OH-минала – от  $11$  до  $33\%$ . Магнетит нацело окислен. Ильменит обладает низкими содержаниями как  $MgO$  ( $0,16\text{--}0,42\%$ ), так и  $MnO$  ( $1,85\text{--}2,45\%$ ). Сульфиды, как правило, нацело окислены. В сохранившихся зернах пирита отмечаются лишь несколько повышенные содержания  $Pb$  ( $0,2\text{--}0,4\%$ ) и  $Bi$  ( $0,15\text{--}0,25\%$ ). В зернах сфалерита определено  $0,26\%$   $Sn$  и  $0,34\%$   $Cu$ .

*Трахиандезиты (кварцевые латиты)* эвтакситовые, порфиоровые и сериально-порфиоровые, с андезитовой, гиалопилитовой или (реже) пилотакситовой основной массой, насыщенной нечетко ориентированными лейстами плагиоклаза, микровключениями биотита, санидина и кварца. Присутствуют участки микрогипидиоморфнозернистого сложения из лейст олигоклаза, мелких табличек калишпата, актинолитизированной роговой обманки, небольшого количества кварца и крупных зерен циркона и апатита.

Среди порфиоровых выделений преобладает многозональный плагиоклаз ( $62\text{--}30\%$   $An$ ) с олигоклазовой периферической зоной. Границы зон часто прихотливо оплавлены, что указывает на неоднократное растворение кристаллов в расплаве в процессе продвижения последнего к поверхности. В меньшем количестве наблюдаются вкрапленники диопсид-авгита и более поздний, корродирующий пироксен красно-бурый опаци-тизированный магнезиальный биотит (см. табл. 1). Реже отмечаются псевдоморфозы актинолита по амфиболу и короткие призмы и неправильной формы зерна энстатита в срастании с диопсид-авгитом. Выделения пироксена в большинстве случаев замещены агрегатом карбоната и клино-

## Состав биотитов вулканических пород Хара-Сисского поля (мас. %)

Table 1

## Composition of biotites of the Khara-Siss field volcanic rocks (wt. %)

| Оксид, элементы,<br>параметры  | P2390/3 трахиандезит |       |       |       |       | O166/5<br>трахибазальт |
|--------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
|                                |                      |       |       |       |       |                        |
| SiO <sub>2</sub>               | 35,63                | 35,70 | 35,82 | 36,27 | 37,15 | 37,79                  |
| TiO <sub>2</sub>               | 5,42                 | 5,85  | 6,52  | 7,03  | 4,96  | 5,47                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14,08                | 14,49 | 14,06 | 13,73 | 13,14 | 12,72                  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,08                 | 0,06  | Н/о   | 0,10  | 0,06  | Н/о                    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,36                 | 0,41  | Н/о   | Н/о   | 0,79  | 1,87                   |
| FeO                            | 12,29                | 11,71 | 11,60 | 12,62 | 10,39 | 18,01                  |
| MnO                            | Н/о                  | Н/о   | Н/о   | Н/о   | Н/о   | Н/о                    |
| MgO                            | 15,36                | 15,12 | 15,18 | 14,19 | 16,86 | 13,54                  |
| CaO                            | Н/о                  | 0,01  | 0,05  | 0,38  | 0,02  | 0,08                   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,15                 | 0,17  | 0,36  | 0,10  | 0,15  | Н/о                    |
| K <sub>2</sub> O               | 9,81                 | 8,73  | 9,70  | 9,65  | 9,32  | 9,23                   |
| Cl                             | 0,05                 | 0,04  | 0,25  | 0,05  | 0,68  | 0,42                   |
| F                              | 2,27                 | 2,41  | 2,85  | 1,65  | 2,94  | 0,61                   |
| H <sub>2</sub> O               | 2,79                 | 3,42  | 2,00  | 1,80  | 2,97  | 0,83                   |
| f, %                           | 31,6                 | 31,0  | 30,0  | 33,4  | 27,0  | 44,9                   |
| T, °C                          | 805                  | 820   | 832   | 827   | 810   | 772                    |
| P, ГПа                         | 0,08                 | 0,15  | 0,13  | 0,1   | 0,06  | 0,12                   |
| H <sub>2</sub> O, % в расплаве | 2,2                  | 2     | 1,5   | 1,5   | 2     | 3                      |
| log f O <sub>2</sub>           | -10                  | -10   | -10   | -11   | -9    | -13                    |
| log f H <sub>2</sub> O         | 2,93                 | 2,77  | 2,88  | 2,89  | 3,34  | 3,04                   |
| log f HCl                      | 3,3                  | 3,3   | 4,18  | 3,36  | 5,21  | 4,34                   |
| log f HF                       | 0,16                 | 0     | 0,4   | 0,22  | 0,74  | 0,16                   |

*Примечание.* Анализы выполнены в лаборатории физико-химических методов исследования ИГАБМ СО РАН на микроанализаторе Camebax-micro С.П. Роевым. Определение температуры по [11]; давления – по [12]; log f O<sub>2</sub> – [13]; log f H<sub>2</sub>O, log f HCl, log f HF – [14]; содержание воды в расплаве – по [15].

*Notes.* Analyses are performed in DPMGI SB RAS on microanalyzer Camebax-micro S. P. Roev. Determination of temperatures: T – by [11]; pressure P – by [12]; log f O<sub>2</sub> – [13]; log f H<sub>2</sub>O, log f HCl, log f HF – [14]; water content in the melt – by [15].

цоизита. Биотит обогащен фтором (1,6–2,9 %). В наиболее свежих образцах содержание в нем хлора достигает 0,68 %. Расчетная температура кристаллизации – 805–832 °C при давлении 0,1–0,15 ГПа. Кристаллизация проходила в окислительных условиях при высокой активности воды и галогенов из маловодного расплава при содержании воды в нем не более 2 %. В кварцевых латитах наряду с перечисленными присутствуют выделения санидина. Отмечаются неправильной формы трещиноватые реститы кристаллов основного плагиоклаза и кварца (рис. 2, д).

Акцессорные минералы трахиандезитов представлены цирконом с варьирующими от 74 в центре до 36 по периферии отношениями ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> и бедными всеми элементами-примесями. Пирит

трахиандезитов также беден элементами-примесями. Ильменит обладает низкими содержаниями как MgO (не более 0,35 %), так и MnO (0,72–1,73 %).

*Риолит- и дацит-порфиры* обычно массивные, мелкопористые, изредка улавливается неотчетливая флюидальность. Структуры порфировые и эвтакситовые, преимущественно с микропиклитовой основной массой из тончайшего агрегата микролитов полевых шпатов и кварца. Реже структура основной массы фельзитовая или гиалопилитовая, с мелкими лейстами кислого плагиоклаза, микротабличками санидина и изометричными зернышками кварца в разложенном стекле кислого состава; в единичных случаях – гранофировая.

## Средние составы вулканитов Хара-Сисского поля, %

Table 2

## Average compositions of the Khara-Siss field volcanic rocks, %

| Оксиды, %                      | Раннемеловые вулканиты |         |                       | Позднемеловые вулканиты |                          |                    |                         |          |                        |
|--------------------------------|------------------------|---------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|----------|------------------------|
|                                | андезит                | дациты  | риолиты,<br>риодациты | трахиба-<br>залыт       | трахиандези-<br>базальты | трахи-<br>андезиты | трахидациты,<br>трахиты | грейзены | щелочные<br>лампрофиры |
|                                | n = 1                  | n = 1   | n = 5                 | n = 1                   | n = 4                    | n = 12             | n = 7                   | n = 3    | n = 2                  |
| SiO <sub>2</sub>               | 57,03                  | 68,03   | 72,77                 | 49,96                   | 51,63                    | 57,52              | 61,25                   | 78,67    | 61,62                  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,73                   | 0,85    | 0,34                  | 0,98                    | 1,63                     | 0,86               | 1,00                    | 0,25     | 0,28                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14,97                  | 14,51   | 13,18                 | 16,24                   | 17,21                    | 15,45              | 14,95                   | 12,27    | 17,54                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,81                   | 3,52    | 1,60                  | 3,39                    | 4,97                     | 1,61               | 2,10                    | 0,98     | 2,56                   |
| FeO                            | 2,66                   | 2,75    | 1,08                  | 4,16                    | 3,42                     | 4,29               | 3,31                    | 0,75     | 2,90                   |
| MnO                            | 0,05                   | 0,02    | 0,04                  | 0,14                    | 0,12                     | 0,08               | 0,07                    | 0,02     | 0,14                   |
| MgO                            | 4,24                   | 0,35    | 0,54                  | 5,19                    | 3,79                     | 3,83               | 2,66                    | 0,12     | 0,02                   |
| CaO                            | 7,15                   | 0,77    | 0,42                  | 9,25                    | 7,02                     | 5,11               | 3,62                    | 0,13     | 1,47                   |
| Na <sub>2</sub> O              | 2,00                   | 4,25    | 2,36                  | 2,17                    | 3,25                     | 2,80               | 3,00                    | 0,02     | 5,96                   |
| K <sub>2</sub> O               | 3,79                   | 3,31    | 5,11                  | 4,10                    | 3,69                     | 5,28               | 5,08                    | 4,61     | 6,47                   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,29                   | 0,04    | 0,08                  | 0,17                    | 0,63                     | 0,48               | 0,36                    | 0,05     | 0,07                   |
| CO <sub>2</sub>                | 2,08                   | 0,13    | 0,74                  | 1,60                    | 0,85                     | 0,64               | 1,00                    | 0,34     | He обн.                |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0,57                   | 0,06    | 0,52                  | 0,53                    | 0,31                     | 0,35               | 0,14                    | 0,19     | 0,06                   |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 1,28                   | 0,51    | 0,83                  | 2,20                    | 1,02                     | 1,28               | 0,95                    | 1,85     | 0,24                   |
| F                              | 0,25                   | 0,01    | 0,12                  | 0,28                    | 0,22                     | 0,23               | 0,14                    | 0,12     | 0,11                   |
| Cl                             | He опр.                | 0,15    | 0,03                  | 0,14                    | 0,09                     | 0,10               | He обн.                 | 0,02     | 0,07                   |
| Li <sub>2</sub> O              | 0,018                  | 0,001   | 0,0086                | 0,0091                  | 0,0091                   | 0,0069             | 0,0071                  | 0,0115   | 0,007                  |
| Rb <sub>2</sub> O              | 0,029                  | 0,0028  | 0,0195                | 0,004                   | 0,015                    | 0,0238             | 0,0195                  | 0,04     | 0,0076                 |
| Cs <sub>2</sub> O              | 0,001                  | He обн. | 0,001                 | He обн.                 | He обн.                  | 0,002              | 0,001                   | 0,001    | He обн.                |
| S                              | 0,04                   | He обн. | 0,09                  | 0,18                    | 0,11                     | 0,17               | 0,25                    | 0,10     | He обн.                |
| Ппп                            | He обн.                | He обн. | 0,64                  | 0,32                    | 0,43                     | 0,53               | 0,18                    |          | 0,22                   |
| Сумма                          | 99,42                  | 99,20   | 100,00                | 100,48                  | 100,10                   | 100,29             | 99,95                   | 100,35   | 99,69                  |
| f, %                           | 56,3                   | 97,7    | 83,2                  | 59,3                    | 68,9                     | 60,6               | 67,0                    | 93,5     | 99,6                   |
| q                              | 12,8                   | 28,7    | 38,8                  |                         | 1,8                      | 6,8                | 13,6                    |          |                        |
| or                             | 23,4                   | 19,9    | 31,0                  | 25,3                    | 22,4                     | 31,2               | 30,8                    |          | 38,6                   |
| ab                             | 17,7                   | 36,5    | 20,5                  | 19,2                    | 28,2                     | 22,9               | 26,0                    |          | 49,1                   |
| an                             | 21,6                   | 3,6     | 1,7                   | 23,5                    | 22,1                     | 14,4               | 12,3                    |          | 2,1                    |
| ne                             |                        |         |                       |                         |                          |                    |                         |          | 1,0                    |
| c                              |                        |         | 3,9                   |                         |                          |                    | 0,2                     |          |                        |
| di                             | 10,6                   | 2,7     |                       |                         | 7,4                      | 1,7                | 3,0                     |          | 3,8                    |
| hy                             | 7,5                    |         | 1,8                   | 18,6                    | 6,3                      | 13,9               | 8,3                     |          |                        |
| ol                             |                        | 1,7     |                       | 17,6                    |                          |                    |                         |          | 0,8                    |
| DI                             | 53,9                   | 87,8    | 94,2                  | 44,5                    | 50,4                     | 60,9               | 70,6                    |          | 88,7                   |
| Kuno                           | 27,9                   | 8,8     | 5,2                   | 27,8                    | 20,8                     | 20,3               | 16,5                    |          | 0,1                    |
| Rittman                        | 2,2                    | 2,3     | 1,9                   | 4,7                     | 4,7                      | 4,3                | 3,5                     |          | 8,2                    |
| T, °C                          | 1100                   | 780     | 800                   | 1175                    | 1175                     | 1130               | 1100                    |          | 1130                   |
| P, ГПа                         | 1,2                    | 0,8     | 0,5                   | 1,7                     | 1,8                      | 1,4                | 1,2                     |          | 1,7                    |
| H, км                          | 255                    | 202     | 260                   | 289                     | 278                      | 313                | 294                     |          | 350                    |

| Оксиды, %                                 | Раннемеловые вулканиты |        |                    | Позднемеловые вулканиты |                       |               |                      |          |                     |
|---|------------------------|--------|--------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|----------|---------------------|
|   | андезит                | дациты | риолиты, риодациты | трахибазальт            | трахиандезит-базальты | трахиандезиты | трахидациты, трахиты | грейзены | щелочные лампрофиры |
|   | n = 1                  | n = 1  | n = 5              | n = 1                   | n = 4                 | n = 12        | n = 7                | n = 3    | n = 2               |
| Элементы в кларках концентрации (по [16]) |                        |        |                    |                         |                       |               |                      |          |                     |
| F   | 5                      | 2      | 1,5                | 20                      | 4,2                   | 4             | 2,6                  | 1,5      | 1,6                 |
| Cl  | 2                      | 5      | 1,6                | 18,9                    | 15                    | 11            | 2,5                  | 1        | 2,6                 |
| B   | 1,2                    | 2,4    | 1,6                | 10                      | 1,8                   | 0,8           | 1,1                  | 3,7      | 1,9                 |
| Sn  | 2,5                    | 1,6    | 1,3                | 14,4                    | 1,6                   | 2,6           | 6,3                  | 7,5      | 2,4                 |
| Pb  | 1,8                    | 3,3    | 3,1                | 111                     | 3,8                   | 3,1           | 7,1                  | 4,7      | 3,3                 |
| Ag  | 2,9                    | 1      | 0,9                | 5                       | 2,4                   | 2,2           | 4,5                  | 31,6     | 1,8                 |
| Au  | 1                      | 1      | 3,9                | 5                       | 6,5                   | 12,9          | 147                  | 7,4      | 5                   |

*Примечание.* Анализы выполнены в лаборатории физико-химических методов исследования ИГАБМ СО РАН. Определение температуры для основных пород по [17], для кислых – по [18], давления – по [19], Н – глубина до сейсмофокальной зоны – по [20].

*Note.* The analyses were performed in DPMGI SB RAS Determination of the temperature for the basic rocks by [17], for acidic rocks – by [18], pressure – by [19], H-depth to seismofocal zone – by [20].

Порфиновые выделения в дацитах сложены плагиоклазом, клинопироксеном, биотитом. В риолит-порфирах к ним присоединяются кварц и санидин. Плагиоклаз вкрапленников – зональный андезин, в большинстве случаев интенсивно (до полных псевдоморфоз) замещен мелкозернистым агрегатом кальцита и серицита, так что иногда фиксируется только по тонкой оторочке олигоклаз-альбита. Плагиоклаз мелких кристалликов в основной массе – полидвойникованный олигоклаз, часто нацело серицитизированный. Клинопироксен практически полностью замещен клиноцоизитом или мелкозернистым хлорит-карбонатным агрегатом. Биотит дает крупные уплощенные опацицитизированные чешуйки с плеохроизмом от темно-бурого до светло-коричневого. Чешуйки биотита и все включения в нем нередко обрамлены каемками из мелких кристалликов магнетита. В совместных сростках с плагиоклазом биотит приспособляется к габитусу последнего, т. е. образуется позднее. Вторая генерация биотита дает разрозненные чешуйки в основной массе.

В риолит-порфирах преобладают вкрапленники кварца. Они образуют сглаженных очертаний зерна без блокового угасания, часто в фибролитовой кайме. В одном из шлифов наблюдалось обрастание кварцем альбитизированного санидина. Породы грейзенизированы, с образованием крупной вкрапленности и гнезд арсенипирита, мелкочешуйчатого мусковита и кальцита. В грейзенах по риолит-порфирам сохра-

няются только вкрапленники кварца, тогда как все остальные выделения и основная масса замещены тонким кварц-мусковитовым агрегатом с сыпью рудного.

Для всех пород верхней подтолщи, особенно наиболее основных из них, характерна насыщенность тонко-игольчатым апатитом как вкрапленников, так и основной массы, а также интенсивный катаклаз порфириновых выделений.

Редкие дайки щелочных лампрофиров сложены мелкозернистым агрегатом из призмочек плагиоклаза и клинопироксена, редкими ксеноморфными чешуйками ярко-коричневого биотита, интерстиции между которыми выполнены единичными зернами санидина и нефелина. На этом фоне выделяются крупные вкрапленники оливина и клинопироксена (рис. 2, e).

**Петро- и геохимические особенности вулканитов.** Вулканиты Хара-Сисского поля, особенно нижней раннемеловой подтолщи, интенсивно изменены, поэтому при расчете средних использовано только ограниченное количество анализов, выполненных по наименее измененным образцам (табл. 2). По химическому составу среди раннемеловых вулканитов резко преобладают нормально-щелочные высокодифференцированные (DI = 88–96 %) риодациты и риолиты, менее распространены андезиты (рис. 3, a, б). Риолиты и риодациты гиперглиноземистые (индекс Шенда 1,19–1,53), железистые (f = 73 %), высококальциевой известково-щелочной серии, гиперстен-нормативные, с преобладанием нор-



мические серии вулканитов. Поля диаграммы [22]: I – низкокалиевая толеитовая, II – среднекалиевая известково-щелочная, III – высококалиевая известково-щелочная, IV – шошонитовая петрохимические серии;  $\epsilon$  – серии щелочности. Главные тренды [23]: CLA – толеитовый океанический, CAI – известковый низкощелочной (островодужный), CA – известково-щелочной (коровый), НКО – высококалиевый (орогенный), L – латитовый, T – трахитовый, AB – щелочнобазальтовый, B<sub>1</sub> – базанитовый, B<sub>2</sub> – нефелинит-базанитовый, N – нефелинитовый, K – кимберлитовый. Ac – активность катионов;  $\epsilon$  – соотношения Sr – Rb/Sr в вулканитах. Тренды дифференциации типовых серий [24]: I – толеитовая островных дуг, II – известково-щелочная островных дуг, III – известково-щелочная активных окраин, IV – рифтовых зон континентов; I, S, A – петротипы гранитоидов;  $\delta$  – соотношения Zr – Nb – Y в вулканитах и дайках основного состава. Поля диаграммы [25]: AI, AII – внутриплитные щелочные базальты; AII+C – внутриплитные толеиты; B – базальты MORB, C+D – базальты островных дуг.

**Fig. 3.** Parameters of composition of the Cretaceous volcanic rocks of the Khara-Siss field

1 – Early Cretaceous volcanic rocks, 2 – Late Cretaceous volcanic rocks, 3 – alkaline lamprophyre.  
 $a$  – SiO<sub>2</sub> ratios – (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O). Diagram fields [21]: I – gabbro; II – gabbro-diorites; III – diorites, IV – granodiorites, V – granites; VI – subalkaline gabbro; VII, VIII – monzonites; IX, X – syenites; XI – alkaline granites;  $\delta$  – Petrochemical series of volcanic rocks. Diagram fields [22]: I – low potassium tholeiite, II – medium potassium calc-alkaline, III – high potassium calc-alkaline, IV – shoshonite petrochemical rock series;  $\epsilon$  – Alkalinity series. Principal trends [23]: CLA – tholeiite oceanic, CAI – calc-low alkaline (island-arc), CA – calc-alkaline (crust), НКО – high-potassium (orogenic), L – latite, T – trachyte, AB – alkaline-basalt, B<sub>1</sub> – basanite, B<sub>2</sub> – nephelinite-basanite, N – nephelinite, K – kimberlite. Ac – cation activity;  $\epsilon$  – Sr – Rb/Sr ratios in volcanic rocks. Trends of differentiation of type series [24]: I – tholeiite rock series of island arcs, II – calc-alkaline rock series of island arcs, III – calc-alkaline rock series of active margins, IV – rift zones of continents I, S, A – petrotypes of granitoids;  $\delta$  – Zr – Nb – Y ratios in volcanic rocks and dikes of basic composition. Diagram fields [26]: AI, AII – Intraplate alkaline basalts; AII+C – Intraplate tholeiites; B – MORB basalts, C+D – basalts of island arcs.

мативного орт над аб. Андезиты метаглиноземистые (индекс Шенда 0,7–0,8), магнезиально-железистые ( $f = 53,3 \%$ ), также высоко-калиевой известково-щелочной серии, с преобладанием нормативного ортоклаза над альбитом и без нормативного корунда. По параметрам состава все раннемеловые вулканиты отвечают поздне- или посторогенным образованиям активной континентальной окраины (рис. 3,  $\epsilon$ ,  $\delta$ ). Близость значений коэффициента Ритзмана для всех пород и закономерное снижение индекса Куно с ростом кремнекислотности позволяют рассматривать изученные раннемеловые вулканиты как производные единой вулканической серии корового происхождения, состав которых менялся с перемещением очагов плавления из амфиболитовых горизонтов в метапелитовые  $[Al/(Mg+Fe) \text{ mol.} - Ca/(Mg+Fe) \text{ mol.}]$  для андезитов: 1,06–0,66; для наименее измененных образцов риолитов: 3,5–0,05, 3,8–0,02 [25]. В соответствии с этим температура андезитового расплава определена в 1100 °C, дацитового – в 1000, риолитового – в 800 °C [18], а расчетное давление при магмогенерации в 1,2, 1 и 0,5 ГПа [20]. Кремнекислые разности по соотношениям Rb и Sr отвечают гранитам S-типа, андезиты – I-типу (см. рис. 2,  $\epsilon$ ).

Химический состав вулканитов верхнего мела варьирует от субщелочных пикритов до трахидацитов и трахитов с чередованием в разрезе покровов основного, среднего и кислого состава при преобладании трахиандезитов (латитов). Все породы умеренно-щелочные, шошонитовой серии щелочности (см. рис. 3,  $a$ ,  $b$ ), метаглиноземистые (индекс Шенда 0,8–0,93). Единичные образ-

цы субщелочных пикритов интенсивно каолинизированы ( $Al_2O_3 = 28 \%$ ), что не позволяет дать корректную оценку их нормативного состава. Наиболее основные трахиандезитобазальты оливин-диопсид- или нефелин-оливин-диопсид-нормативные, остальные – диопсид-гиперстен-нормативные, с небольшим содержанием нормативного кварца. Индекс дифференциации варьирует от 40 до 57 %. Нормативный состав плагиоклаза в наименее дифференцированных разностях – 55 % ап. По соотношениям Zr – Nb – Y они определяются как внутриплитные щелочные базальты (рис. 3,  $\delta$ ). Соотношения La/Yb (25–39) – Yb (2,8–3,0) в них характерны для производных расплавов, генерировавшихся в метасоматически обогащенном лерцолите [27]. Расчетная температура расплава 1175 °C, давление при магмообразовании – 1,7 ГПа.

Трахидациты железистые ( $f = 61,4–71,3 \%$ ), метаглиноземистые (индекс Шенда 0,81–0,98), диопсид-гиперстен-нормативные, с близкими содержаниями нормативных ортоклаза и альбита. Расчетная температура расплава 1100 °C при давлении 1,2 ГПа. Вулканиты риолитового состава преобразованы в грейзены, и судить о параметрах их магмогенерации сложно.

Глиноземистость и соотношения Rb и Sr в позднемеловых вулканитах как кислого, так и основного состава определяют их как рифтогенные внутриплитные образования (см. рис. 2,  $\epsilon$ ,  $\delta$ ), а снижение значений индекса Куно с ростом кремнекислотности и близкие значения коэффициента Ритзмана (см. табл. 2) позволяют рассматривать все верхнемеловые вулканиты как

производные единой петрохимической серии мантийного заложения. Все породы этой серии характеризуются высокими содержаниями фосфора, о чем свидетельствует и насыщенность их апатитом. Заметно выше в них, чем в раннемеловых вулканитах, и содержание фтора.

Секущие вулканиты дайки щелочных трахитов также принадлежат шошонитовой серии щелочности. Породы железистые ( $f = 99,6\%$ ), глиноземистые (индекс Шенда 1,02–1,05), нефелин-оливин-диопсид-нормативные, с преобладанием нормативного альбита (47,6–50,7 %) над ортоклазом (37,8–39,4 %). Нормативный плагиоклаз – альбит (4 % an), индекс дифференциации 85,4–90,1 %, коэффициент Ритмана – 8,2, т. е. резко отличается от такового остальных вулканитов поля. Становление даек, как и пород субщелочной ассоциации, проходило в обстановке континентального внутриплитного рифтогенеза. Материнский расплав генерировался при боль-

шем давлении, чем у аналогичных по основности трахитов (1,7 ГПа и 1,2 ГПа) при температуре 1130 °С и при большей глубине до сейсмофокальной зоны (350 км).

Концентрации большинства рудных элементов в раннемагматических вулканитах близки к кларкам или лишь незначительно их превышают (см. табл. 2). Все позднемеловые вулканиты характеризуются высокими содержаниями Ba и Sr: 2000–1400 г/т Ba и 1700–980 г/т Sr вне зависимости от основности пород, а также повышенными, по сравнению как с коровыми образованиями, так и с производными примитивной мантии, концентрациями Rb, Th, U, REE (табл. 3, рис. 4). При этом максимально обогащены редкоземельными и радиоактивными элементами и галогенами наиболее основные породы (см. табл. 2). Суммарное содержание редкоземельных элементов в трахиандезибазах – 452 г/т, что в 4 раза превышает кларковые для основных пород.

Таблица 3

Содержание редкоземельных и радиоактивных элементов в вулканитах Хара-Сисского поля по данным ИСП-МС-анализа, г/т

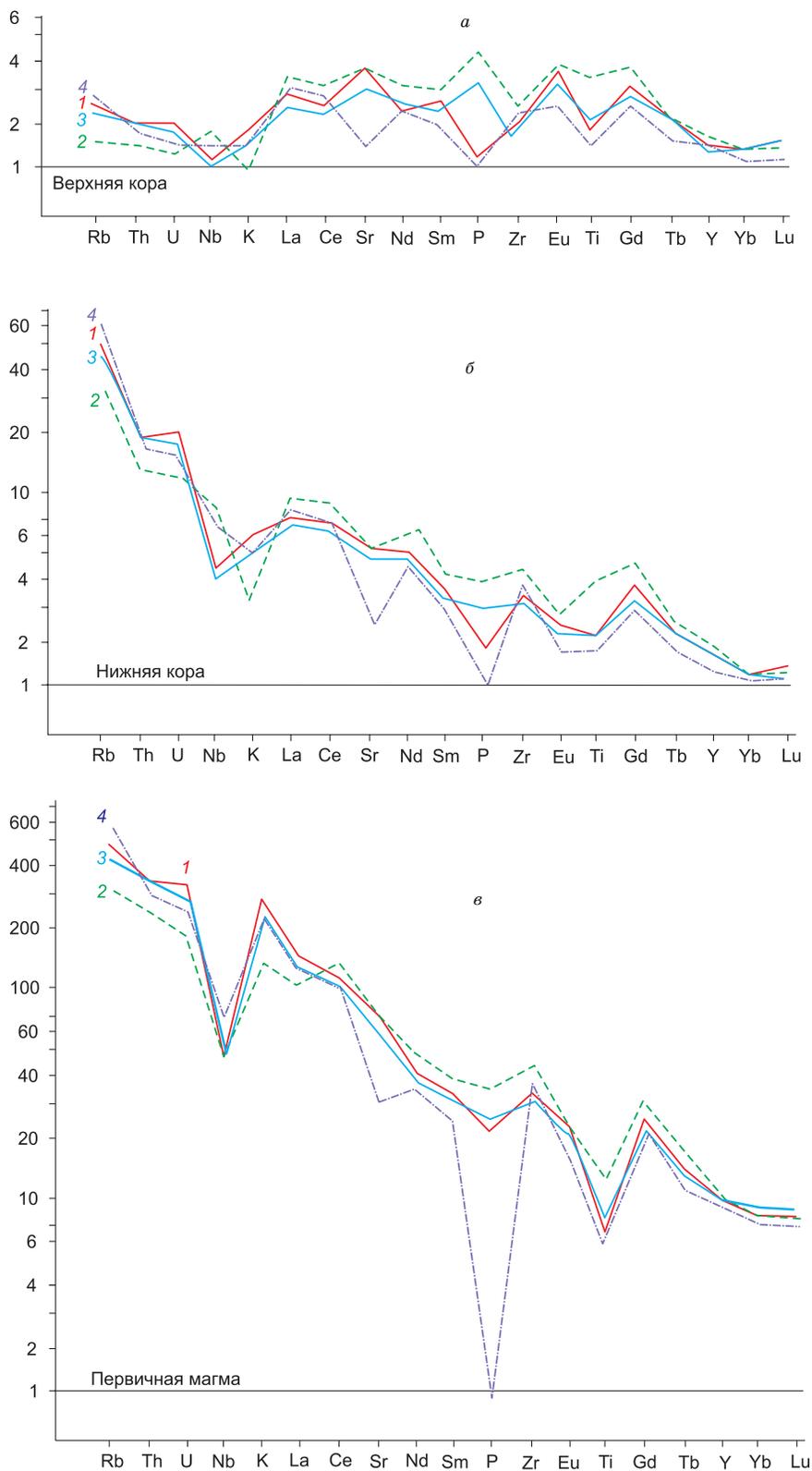
Table 3

Composition of rare-earth and radioactive elements in the Khara-Siss field volcanic rocks according to data of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) (g/t)

| Элемент   | Трахиандезибаза | Трахиандезит | Трахиандезит | Трахидацил |
|-----------|-----------------|--------------|--------------|------------|
| La        | 101 / 5,9       | 83 / 3,9     | 73 / 3,5     | 85 / 1,7   |
| Ce        | 203 / 4,2       | 162 / 3,6    | 146 / 3,2    | 163 / 2,2  |
| Pr        | 23 / 4,6        | 18 / 3,8     | 17 / 3,6     | 17 / 2,7   |
| Nd        | 80,5 / 3,7      | 66 / 3,3     | 60,5 / 3     | 59 / 2,6   |
| Sm        | 13,4 / 2,5      | 12 / 2,6     | 11,15 / 2,4  | 9,2 / 1,1  |
| Eu        | 3,08 / 2,4      | 2,86 / 2,6   | 2,61 / 2,4   | 2,08 / 1,5 |
| Gd        | 14 / 2,6        | 12,3 / 2,3   | 11,65 / 2,2  | 10,1 / 7,2 |
| Tb        | 1,46 / 1,8      | 1,33 / 1,4   | 1,28 / 1,4   | 1 / 0,8    |
| Dy        | 7,7 / 3,1       | 7,15 / 1,4   | 7 / 1,3      | 5,55 / 1,1 |
| Ho        | 1,25 / 1,3      | 1,17 / 1     | 1,21 / 1,1   | 0,91 / 0,5 |
| Er        | 3,57 / 1,6      | 3,4 / 1,4    | 3,42 / 1,4   | 2,68 / 0,7 |
| Tm        | 0,44 / 1,8      | 0,45 / 0,18  | 0,48 / 1,8   | 0,35 / 1,2 |
| Lu        | 0,42 / 0,8      | 0,44 / 0,5   | 0,44 / 0,5   | 0,34 / 0,3 |
| Hf        | 11 / 4,2        | 9,8 / 4,7    | 9,2 / 4,4    | 10,1 / 4   |
| Ta        | 2,49 / 3,4      | 1,78 / 1,9   | 1,54 / 1,6   | 2,26 / 0,8 |
| W         | 1,77 / 2,2      | 3,84 / 3,5   | 2,37 / 2,2   | 3,97 / 2,5 |
| Th        | 14,6 / 4,6      | 21 / 3,5     | 21 / 3,5     | 19 / 1,9   |
| U         | 3,45 / 4,3      | 5,7 / 2,6    | 4,91 / 2,2   | 4,57 / 1,7 |
| Сумма REE | 452,82          | 370,10       | 334,74       | 356,21     |

Примечание. В знаменателе кларк концентрации по [6].

Note. In the denominator of Clark concentrations by [6].



**Рис. 4.** Спайдер-диаграммы для поздне меловых вулканитов Хара-Сисского поля. 1 – трахиандезибазальт, 2 и 3 – трахиандезиты, 4 – трахидациты. Нормировано по [28].

**Fig. 4.** 1 – trachyandesibasalt, 2 and 3 – trachyandesites, 4 – trachydacites. Normalized for [28].

Геохимическая специализация позднемеловых вулканитов установлена на Sn, Pb, Ag, Au. Содержание последнего достигает 100 мг/т при кларках 2–3,5 мг/т. С учетом этого факта, а также аномально высокой активности хлора в процессе кристаллизации, вполне ожидаемо образование в связи с ними золоторудных проявлений.

### Заключение

Результаты изучения вулканических образований Хара-Сисского поля позволяют выделить в их составе три серии пород, заметно различающихся по составу и значениям главных петрохимических параметров – индекса Куно и коэффициента Ритмана и отражающих три этапа развития вулканизма. Формирование вулканогенной толщи начиналось в поздне-посторогенной обстановке активной окраины континента и завершилось в обстановке внутриплитного континентального рифтогенеза со сменой существенно коровых образований производными мантийных магм, материнский расплав которых генерировался во все более глубоких горизонтах метасоматизированной мантии, и сменой пород высококальциевой позднеорогенной серии породами латитовой и трахитовой серий. Венчающие эволюцию магматизма территории дайки щелочных лампрофиров принадлежат уже к щелочно-базальтовой серии.

Позднемеловые вулканиты характеризуются повышенными содержаниями Rb, Th, U и всех редкоземельных элементов. По концентрациям последних они наиболее близки к щелочным внутриплитным базальтам, производным метасоматизированной мантии, формирование которых связано с горячими точками [29], что согласуется с рассмотренными выше петро- и геохимическими особенностями базальтоидов поля. Учитывая повышенные концентрации перечисленных элементов во всех позднемеловых вулканитах, можно полагать, что они обусловлены продолжающимся, по крайней мере в позднем мелу, воздействием флюидов, связанных с такими очагами.

Геохимическая специализация всех позднемеловых вулканитов на Au и кристаллизация в условиях высокой – до аномальной активности хлора – его главного комплексообразователя, вполне ожидаема генерация в процессе формирования вулканогенной толщи золоторудных проявлений.

### Литература

1. *Ставский А.П.* Нижнеиндигирская рифтовая зона – новый элемент структуры Северо-Востока

СССР // Докл. АН СССР. 1982. Т. 262, № 6. С. 1443–1446.

2. *Геологическая карта СССР.* Лист R-53-55 (Депутатский). Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Объяснительная записка. СПб. 1992. 111 с.

3. *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)* / под ред. Л.М. Парфенова. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.

4. *Трунилина В.А., Орлов Ю.С., Роев С.П.* Меловой вулканизм Джаятардахского поля (Верхояно-Колымская орогенная область) // Отечественная геология. 2007. № 1. С. 83–92.

5. *Трунилина В.А., Орлов Ю.С., Роев С.П.* Петрология даек Джаятардахского вулканогенного поля и их взаимосвязь с оруденением // Отечественная геология. 2016. № 6. С. 35–42.

6. *Некрасов И.Я.* Магматизм и рудоносность северо-западной части Верхояно-Чукотской складчатой области. М.: Наука, 1962. 333 с.

7. *Самусин А.И.* Государственная геологическая карта СССР м-ба 1:200 000. Серия Яно-Индибирская. Лист R-54-XXIX-XXX. Объяснительная записка. М., 1979. 79 с.

8. *Yavuz F.* Win Pyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry // American Mineral. 2013. V. 98. P. 1338–1359. DOI: 10.2138/am.2013.4292

9. *Рябов В.В., Золотухин В.В.* Минералы дифференцированных траппов: монография. Новосибирск: Наука, 1977. 387 с.

10. *Rudilfi R., Renzulli A.* Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1130 °C and 2,2 Gpa // Contrib. Miner. Petrol. 2012. V. 163. P. 877–895. DOI: 10.1007/s00410-011-0704-6

11. *Henry D.A., Guidotti Ch.V., Thompson J.A.* The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implication for geothermometry and Ti-substitution mechanism // Amer. Mineral. 2005. V. 90. P. 316–328. DOI: 10.2138/am.2005.1498

12. *Uchida E., Endo S., Makino M.* Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits // Resource Geology. 2007. V. 57, N 1. P. 47–56. DOI: 10.1111/j.1751-3928.2006.00004.x

13. *Трошин Ю.П., Гребенищикова В.И., Антонов А.Ю.* Летучие компоненты в биотитах и металлогеническая специализация интрузий // Минералогические критерии оценки рудоносности. Л.: Наука, 1981. С. 73–83.

14. *Wones D.R., Eugster H.P.* Stability of biotite: experiment, theory and application // Amer. Mineral. 1985. N 9. P. 1228–1272.

15. *Brown G.G.* A comment on the role of water in the partial fusion of crystal rocks // Earth and Planet. Sci. Lett. 1970. V. 9. P. 13–22.

16. *Овчинников Л.Н.* Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 248 с.

17. *French W.J., Cameron E.P.* Calculation on the temperature of crystallization of silicates from basaltic melts // Mineral Mag. 1981. V. 44, N 333. P. 19–26.

18. *Jung S., Pfander J.A.* Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids – constrains from CaO/Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> and accessory mineral saturation thermometry // *European Journal of Mineralogy*. 2007. N 1. P. 5–40. DOI: 10.1127/0935-1221/2007/0019-1774

19. *Перчук Л.Л., Аранович Л.А., Косякова Н.А.* Термодинамические модели зарождения и эволюции базальтовых магм // *Вестник МГУ. Сер. геол.* 1982. № 4. С. 3–26.

20. *Пискунов Б.М., Абдурахманова А.И., Ким Ч.У.* Соотношение “состав–глубина” для вулканов Курильской островной дуги и его петрологическое значение // *Вулканоология и сейсмология*. 1979. № 4. С. 57–67.

21. *Wilson M.* Igneous petrogenesis. London. Unwin Hyman, 1989.

22. *Whiteford D.G., Nicholls I.A., Taylor S. R.* Spatial variations in the geochemistry of quaternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali // *Contribs. Mineral. and Petrol.* 1979. V. 70. P. 341–356.

23. *Бородин Л.С.* Петрохимия магматических серий. М.: Наука, 1987. 241 с.

24. *Даценко В.М.* Петрогеохимическая типизация гранитоидов юго-западного обрамления Сибирской платформы // *Материалы Второго Всеросс. петрограф. совещ.* Т. 2. Сыктывкар, 2000. С. 270–274.

25. *Gerdes A., Worner G., Henk A.* Post-collisional granite generation and HT-LP metamorphism by radiogenic heating: the Variscan South Bohemian Batholith // *J. Geol. Soc.* London. 2000. V. 157. P. 577–587.

26. *Meschede M.* A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram // *Chemical Geology*. 1986. V. 56. P. 207–218.

27. *Drill S.I., Kuzmin M.I., Tsipukova S.S., Zonen-shain L.P.* Geochemistry of basalts from the West Woodlark, Lau and Manus basins: implication for their petrogenesis and source rock composition // *Marine Geology*. 1997. V. 142. P. 57–83.

28. *Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.* Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 380 с.

29. *Леснов Ф.П.* Редкоземельные элементы в ультрамафических и мафических породах и их минералах. Кн. 1. Главные типы пород, породообразующие минералы. Новосибирск: Гео, 2009. 403 с.

## References

1. *Stavskiy A.P.* Nizneindigirskaya riftovaya zona – novyi element struktury Severo-Vostoka SSSR // *Docl. AN SSSR*. 1982. V. 262, N 6. P. 1443-1446.

2. *Geologicheskaya karta SSSR*. List R-53-55 (Deputatskiy). Mashtab 1:1 000 000 (novaia seria). Ob`iasnitelnaia zapiska. SPb, 1992. 111 p.

3. *Tectonika, geodinamika i metallogeniia territorii Respubliki Sakha (Yakutia)* M.: MAIK “Nauka/Interperiodika”, 2001, 571 s.

4. *Trunilina V.A., Orlov Yu.S., Roev S.P.* Melovoi vulkanizm Dzakhtardakhsogo polia (Verkhoyano-Kolym-

kaya orogennaia oblast`) // *Otechestvennaia geologiya*. 2007. N 1. P. 83–92.

5. *Trunilina V.A., Orlov Yu.S., Roev S.P.* Petrologiya daek Dzakhtardakhsogo vulkanogenogo polia I ikh vzaimosvyaz` s orudneniem // *Otechestvennaia geologiya*. 2016. N 6. P. 35–42.

6. *Nekrasov I.Ya.* Magmatizm i rudonosnost` severo-zapadnoi chasti Verkhoyano-Chukotskoi skladchatoi oblasti. M.: Nauka, 1962.

7. *Samusin A.I.* Gosudarstvennaia geologicheskaya karta SSSR m-ba 1:200000. Seriya Yano-Indigirskaya. List R-54-XXIX-XXX. Ob`yasnitel`niia zapiska. M., 1979.

8. *Yavuz F.* Win Pyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry // *American Mineral*. 2013. V. 98. P. 1338–1359. DOI: 10.2138/am.2013.4292

9. *Ryabov V.V., Zolotukhin V.V.* Mineraly differentsirovannykh trappov: monografiia. Novosibirsk: Nauka, 1977.

10. *Rudilfi R., Renzoli A.* Calcik ampiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1130 °C and 2,2 Gpa // *Contrib. Miner. Petrol.* 2012. V. 163. P. 877–895. DOI: 10.1007/s00410-011-0704-6

11. *Henry D.A., Guidotti Ch.V., Thompson J.A.* The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implication for geothermometry and Ti-substitution mechanismus // *Amer. Mineral*. 2005. V. 90. P. 316–328. DOI: 10.2138/am.2005.1498

12. *Uchida E., Endo S., Makino M.* Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits // *Resource Geology*. 2007. V. 57, N 1. P. 47–56. DOI: 10.1111/j.1751-3928.2006.00004.x

13. *Troshin Yu.P., Grebenshikova V.L., Antonov A.Yu.* Letuchie komponenty v biotitakh i metallogenicheskaya specializatsiia intruzii // *Mineralogicheskie kriterii ocenki rudonosnosti* // *The mineralogical criteria of ore content*. L.: Nauka, 1981. P 73–83.

14. *Wones D.R., Eugster H.P.* Stability of biotite: experiment, theory and application // *Amer. Mineral*. 1985. N 9. P. 1228–1272.

15. *Brown G.G.* A comment on the role of water in the partial fusion of crystal rocks // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1970. V. 9. P. 13–22.

16. *Ovchinnikov L.N.* Prikladnaia geokhimiia. M.: Nedra, 1990.

17. *French W.J., Cameron E.P.* Calculation on the temperature of crystallization of silicates from basaltic melts // *Mineral Mag.* 1981. V. 44, N 333. P. 19–26.

18. *Jung S., Pfander J.A.* Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids – constrains from CaO/Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> and accessory mineral saturation thermometry // *European Journal of Mineralogy*. 2007. N 1. P. 5–40. DOI: 10.1127/0935-1221/2007/0019-1774

19. *Perchuk L.L., Aranovich L.A., Kosiakova N.A.* Termodinamicheskie modeli zarozdenia i evoluzii basal`tovykh magm // *Vestnik MGU. Seria Geol.* 1982. N 4. P. 3–26.

20. *Piskunov B.M., Abdurakhmanova A.I., Kim Ch.U.* Sootnoshenie “sostav–glubina” dlia vulkanov Kuril`skoi

ostrovnoi dugi i ego petrologicheskoe znachenie // Volcanology and seismology. 1979. N 4. P. 57–67.

21. *Wilson M.* Igneous petrogenesis. London. Unwin Hayman, 1989.

22. *Whiteford D.G., Nicholls I.A., Taylor S. R.* Spatial variations in the geochemistry of quaternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali // *Contribs. Mineral. and Petrol.* 1979. V. 70. P. 341–356.

23. *Borodin L.S.* Petrokhimiya magmaticheskikh serii. M.: Nauka, 1987. 241 p.

24. *Datzenko V.M.* Petrogeokhimiya tipizatsiya granitoidov yugo-zapadnogo obramleniya Sibirskoi platformy // *Materialy Vtorogo Vserossiiskogo petrograficheskogo soveshaniya.* V. 2. Syvtyvkar, 2000. P. 270–274.

25. *Gerdes A., Worner G., Henk A.* Post-collisional granite generation and HT-LP metamorphism by radiogenic heating: the Variscan South Bohemian Batholith // *J. Geol. Soc. London.* 2000. V. 157. P. 577–587.

26. *Meschede M.* A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram // *Chemical Geology.* 1986. V. 56. P. 207–218.

27. *Drill S.I., Kuzmin M.I., Tsipukova S.S., Zonenshain L.P.* Geochemistry of basalts from the West Woodlark, Lau and Manus basins: implication for their petrogenesis and source rock composition // *Marine Geology.* 1997. V. 142. P. 57–83.

28. *Teilor S.R., McLennan S.M.* Kontinental'naya kora, ee sostav i evolutsiya [Continental crust, composition and evolution]. M.: Mir, 1988.

29. *Lesnov F.P.* Redkozemel'nye elementy v ul'tramaficheskikh i maficheskikh porodakh i ikh mineralakh. Kniga 1. Glavnye tipy porod, porodoobrazuyushie mineraly. Novosibirsk: Geo, 2009. 403 p.

*Поступила в редакцию 05.06.2019*

*Принята к публикации 08.08.2019*

#### *About the authors*

TRUNILINA Vera Arkadievna, doctor of geological and mineralogical sciences, principal researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia,

<https://orcid.org/0000-0003-0910-2386>, [v.a.trunilina@diamond.ysn.ru](mailto:v.a.trunilina@diamond.ysn.ru);

ROEV Sergei Prokopievich, candidate of geological and mineralogical sciences, senior researcher. Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia,

<https://orcid.org/0000-0003-3911-2491>, [sproev@mail.ru](mailto:sproev@mail.ru)

#### *Citation*

*Trunilina V.A., Roev S.P.* Cretaceous volcanism of the Khara-Siss field (Verkhoyansk-Kolyma orogenic area) // *Arctic and Subarctic natural resources.* 2019; vol. 24, N 3, pp. 64–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-6>

#### *Об авторах*

ТРУНИЛИНА Вера Аркадьевна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник. Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, проспект Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0003-0910-2386>, [v.a.trunilina@diamond.ysn.ru](mailto:v.a.trunilina@diamond.ysn.ru);

РОЕВ Сергей Прокопьевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, проспект Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0003-3911-2491>, [sproev@mail.ru](mailto:sproev@mail.ru)

#### *Информация для цитирования*

*Трунилина В.А., Роев С.П.* Меловой вулканизм Хара-Сисского поля (Верхояно-Колымская орогенная область) // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики.* – 2019. Т. 24. № 3. С. 64–79. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-6>