

УДК 550.834:550.838.2:551.214.6(571.645)

## ВУЛКАНИЧЕСКИЙ МАССИВ РАЙКОКЕ (КУРИЛЬСКАЯ ОСТРОВНАЯ ДУГА)

© 2021 г. Ю. И. Блох<sup>a, \*</sup>, В. И. Бондаренко<sup>b</sup>, А. С. Долгаль<sup>c</sup>, П. Н. Новикова<sup>c</sup>, В. В. Петрова<sup>d</sup>,  
О. В. Пилипенко<sup>e</sup>, В. А. Рашидов<sup>a, f, \*\*</sup>, А. А. Трусов<sup>g</sup>

<sup>a</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

<sup>b</sup>Костромской государственной университет им. Н.А. Некрасова, ул. 1 Мая, 16, Кострома, 156961 Россия

<sup>c</sup>Горный институт УрО РАН, ул. Сибирская, 78а, Пермь, 614007 Россия

<sup>d</sup>Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

<sup>e</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

<sup>f</sup>Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,

просп. 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022 Россия

<sup>g</sup>АО “ГНПП Аэрогеофизика”, Походный проезд, 19, Москва, 125373 Россия

\*e-mail: yuri\_blokh@mail.ru

\*\*e-mail: rashidva@kscnet.ru

Поступила в редакцию 30.07.2020 г.

После доработки 30.09.2020 г.

Принята к публикации 11.12.2020 г.

Изучен наземно-подводный вулканический массив Райкоке в северной части Центральных Курил, состоящий из острова-вулкана Райкоке и четвертичного подводного вулкана 3.18. Извержение вулкана в июне 2019 г. нанесло значительный урон флоре и фауне о. Райкоке, в очередной раз изменив его облик, а в его кратере появилось озеро. Остров-вулкан Райкоке сложен умеренно-калиевыми породами средней щелочности толеитовой серии от базальтов до андезитов, которые являются типичными островодужными лавами. Впервые опубликованы данные о составе шести отобранных на нем образцов. Подводный вулкан 3.18 на глубине ~800 м сливается основанием с островом-вулканом Райкоке. Привершинная часть, расположенная на глубинах 260–230 м, имеет несколько пиков, а в северо-восточной и юго-восточной частях подножия выявлены экструзии. Вулкан 3.18 сложен андезитами и андезибазальтами. Андезибазальты принадлежат к лавам умеренно-калиевой серии нормального по щелочности ряда. Выполненные исследования позволили предположить, что подводный вулкан 3.18 образовался во время геомагнитной инверсии. В его постройке выделены подводящие каналы и периферические магматические очаги.

**Ключевые слова:** вулканический массив Райкоке, подводный вулкан 3.18, Центральные Курилы

**DOI:** 10.31857/S0203030621030020

### ВВЕДЕНИЕ

22 июня 2019 г. после длительного периода покоя произошло извержение острова-вулкана Райкоке, расположенного в северной части Центральных Курил [Гирина и др., 2019; Гребенников и др., 2020; Дегтерев, Чибисова, 2019; Рашидов и др., 2019; Фирстов и др., 2020; Чибисова и др., 2019; Hedelt et al., 2019; Hуman, Pavolonis, 2020; Muser et al., 2020; Ugolnikov, Maslov, 2019; и др.], которое вызвало значительный интерес как у нас в стране, так и за рубежом. Несмотря на достаточно длительную историю изучения вулкана Райкоке, до появления работы [Рашидов и др., 2019] никто не акцентировал внимание на том, что этот остров-вулкан и расположенный к северо-западу от него четвертичный подводный вулкан 3.18 [Бондарен-

ко и др., 2004; Брусиловский и др., 2004; Подводный вулканизм ..., 1992] представляют собой единый наземно-подводный вулканический массив северо-западного простираения размером 15 × 21 км (по изобате 1200 м). Расстояние между вершинами вулканов — ~7 км, седловина расположена на глубине ~800 м.

Авторы настоящей работы, в течение многих лет занимающиеся изучением таких вулканических массивов в пределах Курильской островной дуги (КОД) [Блох и др., 2006а, 2006б; Бондаренко, Рашидов, 2003а, 2003б, 2018], критически проанализировав доступные литературные источники и свои оригинальные данные, решили получить более реалистичную картину о строении этого вулканического массива, который предлагают назвать

“массив Райкоке” (рис. 1), и характере его вулканической деятельности.

### ОСТРОВ-ВУЛКАН РАЙКОКЕ

Остров-вулкан Райкоке (Столповой, Раукоке, Райкоку, Ракхокко, Шококи, Raikoke, Raikoke Jima, Raikoke-jima Raikoke-shima Raikoke-to, Raikoke-tō) высотой 551 м и размером на уровне моря 2–2.5 км является самым северным островом Центральных Курил. По классификации [Федорченко и др., 1989; Федорченко, Шилов, 1971] он относится к простым крупным конусам, а глубина до сейсмофокальной зоны под ним – 152 км [Абдурахманов и др., 1981; Федорченко и др., 1989; Федорченко, Шилов, 1971]. В работе [Атлас ..., 2009] опубликована датировка возраста Райкоке –  $Q_{IV} \text{vr}_2$ , но непонятно, к какому извержению вулкана она относится.

До извержения 2019 г. на вершине вулкана имелся двоянный кратер диаметром ~700 м и глубиной до 200 м, восточный борт которого был выше, чем западный [Горшков, 1957, 1958, 1967; Левин и др., 2010]. На гребне кратера были распространены пеплы, туфы и отдельные вулканические бомбы. Для ~54.5% площади о. Райкоке были характерны ландшафты стратовулканических конусов с пирокластическим материалом, а в прибрежной полосе до высоты 150 м наблюдались ландшафты абразионно-денудационных уступов со штормовыми валами и валунно-галечным пляжем [Ганзей, 2010].

Подводные склоны Райкоке фиксируются до глубин 750 м на юге, 1000 м на востоке и севере, 800 м на северо-западе, 1500 м на западе и 1000–1500 на юго-западе. Таким образом, максимальная высота Райкоке достигает 2000 м, а ее оценки, приведенные в работах [Горшков, 1967; Левин и др., 2010; Трухин, 2008], являются завышенными. В работе [Апродов, 1982] указано, что Райкоке поднимается с глубин 2000 м, а его вершина – остров диаметром 3 км.

На профиле непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП), пересекающем основание подводного склона о. Райкоке, выделены две амплитудно-скоростные аномалии и газовые столбы [Ломтев, 2014].

Первое описание острова было сделано сотником Иваном Черным, посетившим его в 1769 г. [Полонский, 1871], который называл его “11-й Ракхокко”. Детальный анализ дальнейших описаний о. Райкоке проведен в работах [Горшков, 1954; Красникова, 2018], и мы не будем на нем останавливаться, отметив лишь, что описание острова приводится и капитаном Генри Джеймсом Сноу, неоднократно посещавшим Курилы в середине XIX в. [Сноу, 1902], в котором сказано, что кратер имел глубину 100–200 футов. Извер-

жение 1924 г. существенно углубило кратер Райкоке [Горшков, 1958].

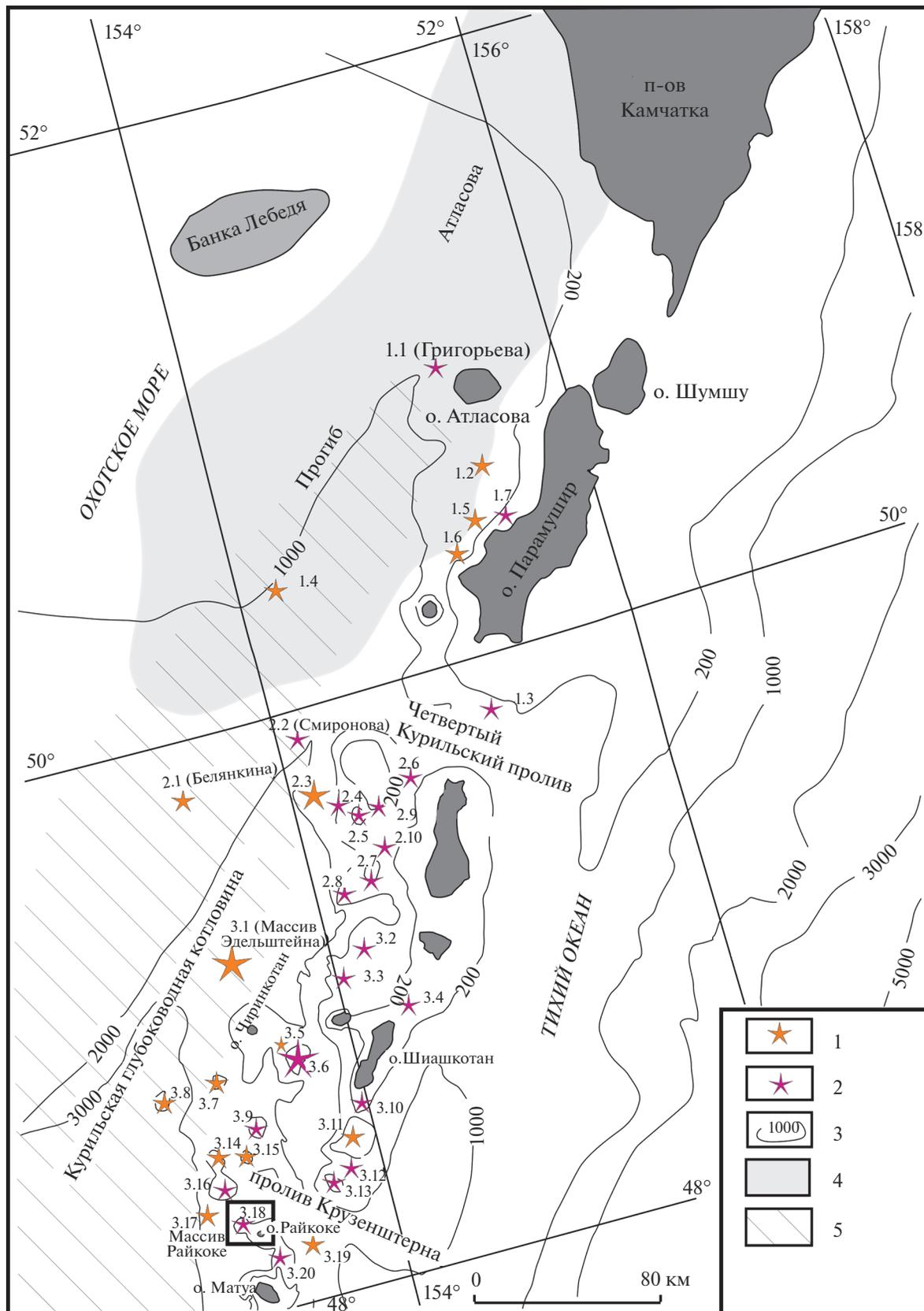
Стратовулкан Райкоке извергался в XVIII–XXI вв. [Атлас ..., 2006; Горшков, 1954, 1957, 1958, 1967; Гущенко, 1979; Рашидов и др., 2019; Рудич, 1978; Сноу, 1902; Sapper, 1927; Simkin, Siebert, 1994; Tanakadate, 1925; и др.]. Пароксизмальные извержения относились к плинианскому типу, а между ними были большие временные перерывы.

Даты извержения в XVIII в. у различных авторов разнятся. Тщательный анализ имевшихся сообщений об извержениях вулкана Райкоке выполнил Г.С. Горшков [1954]. По его мнению, в период 1750–1760 гг. на острове-вулкане произошло сильное извержение, а сообщение об извержениях 1777 и 1780 гг. является ошибочным. Утверждение Г.С. Горшкова об отсутствии извержения в 1780 г., на наш взгляд, является спорным, так как в работе Г.Дж. Сноу [1902], которую он цитирует, указано извержение 1780 г., а по данным [Полонский, 1871; Соловьев, 1945] в этом году из недр Райкоке слышался глухой рокот. В следующей работе Г.С. Горшков [1957] пишет уже о том, что в 1760-ые гг. на вулкане Райкоке произошло сильное извержение.

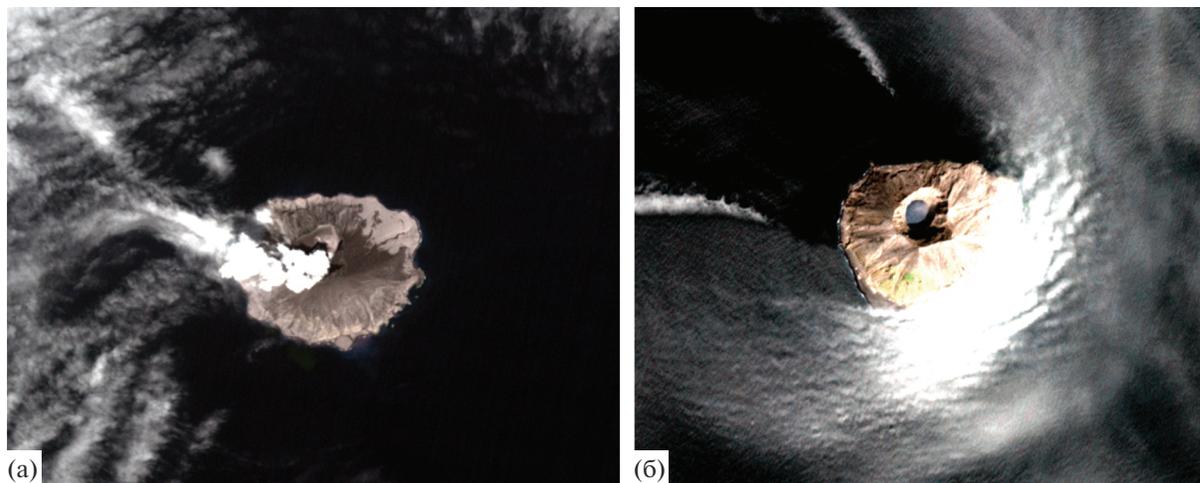
Извержение 1778 г. было катастрофическим [Федорченко и др., 1989]. Индекс вулканической эксплозивности (Volcanic Explosivity Index (VEI)) извержений вулкана Райкоке 1778, 1924 и 2019 гг. равен 4 [Дегтерев, Чибисова, 2019; Фирстов и др., 2020; McMinn, 2012; Newhall, Self, 1982 и др.].

12–13 июня 2009 г., после активной фазы извержения вулкана Пик Сарычева на о. Матуа, отмечалась парогозовая активность Райкоке, что отчетливо видно на рисунке в работе [Рыбин, Чибисова, 2011]. Это также отчетливо видно и на рисунке в работе [McGimsey et al., 2014], в которой указана ошибочная дата проявления парогозовой активности – 12–13 июня 2009 г. Парогозовый шлейф от вулкана Райкоке, возможно с примесью пепла, простирался на 180 км в юго-восточном направлении [McGimsey et al., 2014], а не в северо-восточном направлении, как сказано в работе [Рыбин, Чибисова, 2011; Рыбин и др., 2010]. Однако позднее [Левин и др., 2010., стр. 153] сообщение о парогозовой активности вулкана Райкоке “26 июля 2009 г.”, приведенное в работе [Рыбин и др., 2010], признали ошибочным, хотя в работе [Рыбин и др., 2010, с. 70] приведены даты “12–13 июля”.

Проведенный критический анализ сообщений об активности вулкана Райкоке в 2009 г. говорит о том, что парогозовый шлейф на приведенных спутниковых снимках в работах [Рыбин, Чибисова, 2011; McGimsey et al., 2014] виден отчетливо, и отрицать этот факт, не объясняя возможных причин его природы, нельзя.



**Рис. 1.** Схема расположения подводных вулканов северной части КОД. 1 – островершинные вулканы; 2 – плосковершинные вулканы, 3 – изобаты; 4 – прогиб Атласова; 5 – Курильская глубоководная котловина. Местоположение массива Райкоке оцифровано прямоугольником.



**Рис. 2.** Фумарольная деятельность 30.06.2019 г. ([https://gbank.gsj.jp/vsldb/image/Raikoke/aster/190630\\_099/p\\_fc\\_vnir.png](https://gbank.gsj.jp/vsldb/image/Raikoke/aster/190630_099/p_fc_vnir.png)) (a) и образовавшееся озеро 7.07.2020 г. ([https://gbank.gsj.jp/vsldb/image/Raikoke/aster/200707\\_102/p\\_fc\\_vnir.png](https://gbank.gsj.jp/vsldb/image/Raikoke/aster/200707_102/p_fc_vnir.png)) (б) в кратере острова-вулкана Райкоке. Спутниковые снимки ASTER.

22 июня 2019 г. остров-вулкан Райкоке, молчавший с 1924 г., начал извергаться. Эруптивная колонна поднималась на высоту 9.5–12.5 км над кратером вулкана. Пепловый шлейф распространялся, преимущественно, на восток–северо-восток от вулкана. 23 июня при ширине 750–800 км его протяженность составляла более 2000 км [Рашидов и др., 2019].

Рано утром 23 июня яхта “Викинг” в двух милях от юго-западного берега о. Райкоке попала под сильный пеплопад [Рашидов и др., 2019], а ее экипаж, по сообщению В.Н. Бурканова, при подходе к берегу наблюдал “кипящую воду” и пар. Это извержение нанесло значительный урон флоре и фауне Райкоке и в очередной раз изменило его облик (<https://eugene.kaspersky.ru/2019/09/19/rajkoke-ostrov-neprostojsudby/>).

На спутниковом снимке ASTER 30 июня 2019 г. в кратере вулкана Райкоке наблюдалась мощная фумарольная деятельность (рис. 2а). 13 июля 2019 г., при анализе спутникового снимка Sentinel-2, в кратере Райкоке, в котором отмечалась фумарольная деятельность, было обнаружено озеро площадью ~90000 м<sup>2</sup> [Мельников и др., 2020], а 7 июля 2020 г. это озеро наблюдалось на спутниковом снимке ASTER (см. рис. 2б).

16 сентября 2019 г. на видеоклипах, предоставленных капитаном яхты “Викинг” А.А. Борисовым, отчетливо видна мощная паро-газовая деятельность в прибрежной полосе на северном берегу о. Райкоке (рис. 3) и в кратере вулкана.

В работе [Tanakadate, 1925] приводятся данные о том, что в 15 февраля 1924 г. сильное извержение Райкоке сопровождалось двумя подводными извержениями, произошедшими в 12 милях от него в районе о. Топорковский (Базио-ива), распо-

ложенного рядом с о. Матуа, и указаны координаты этого извержения: 48°20′ с.ш. и 155° в.д. В этом сообщении наблюдаются явные несоответствия, так как реальные координаты о. Топорковский: 48°4.5′ с.ш. 153°17.3′ в.д. На это несоответствие было указано еще в работах Г.С. Горшкова [1957, 1958], который считал, что пункт извержения указан точно, а в координаты о. Топорковский вкралась ошибка, основанная на неточной карте или опечатке. Вместе с тем, в работах [Горшков, 1957; Горшков и др., 1964] без всякого обоснования написано, что подводное извержение произошло на глубине 150 м, а в работе [Гущенко, 1979] сделано еще и предположение о том, что изливались базальты, и даже указаны координаты извержения: 48°4.5′ с.ш. и 153°20′ в.д.

До настоящего времени никто не обратил внимание на то, что широта, указанная в работе [Tanakadate, 1925], совпадает с широтой подводного вулкана 3.18, координаты которого 48°20′ с.ш. и 153°10′ в.д. [Подводный вулканизм ..., 1992], и логичнее предположить, что ошибка вкралась в определение долготы подводного извержения 1924 г., которое, если и происходило, то, скорее всего, в районе этого подводного вулкана.

На основании сообщения Х. Танакадате [Tanakadate, 1925] Г.С. Горшковым [1958, 1967] был сделан вывод, что это единственное достоверное подводное извержение в КОД. На наш взгляд, этот вывод является ошибочным, так как кроме несоответствия места проявления подводной вулканической деятельности и его координат, никакой достоверной информации об извержении нет. По нашему мнению, единственным достоверным подводным извержением в пределах КОД, происходившим на глазах людей, является извержение на подводном склоне острова-



Рис. 3. Парогазовая деятельность на северном берегу о. Райкоке 16.09.2019 г. Фотокадры из видеоклипа А.А. Борисова.

вулкана Алаид в 1933–1934 гг. [Tanakadate, 1934a, 1934b], когда образовался уникальный побочный вулкан Такетоми [Рашидов, 2013а, 2013б].

Несмотря на длительную историю изучения острова-вулкана Райкоке, сведения о составе слагающих его пород малочисленны.

Силикатные анализы двух базальтов приведены в работе [Богоявленская и др., 1966], а средние

данные из 13 анализов для пород, отобранных на островах Райкоке, Расшуа, Матуа, Ушишир и Кетой, в работе [Мархинин, 1967].

Содержания  $\text{SiO}_2$  для двух образцов базальтов и  $\text{Rb}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Sr}$  и  $\text{Sc}$  представлены в работе [Абдурахманов и др., 1981], а содержание  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и соотношение  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  – в работе [Мархинин, Стратула, 1971].

По данным, представленным в работах [Мархинин, 1965; Мархинин, Стратула, 1965], лавы Райкоке представлены плотными базальтами, во вкрапленниках которых встречены оливин, пироксен, авгит и плагиоклаз, относящийся к лаборатору (*An* 67). Среди темноцветных минералов во вкрапленниках наиболее распространен моноклинный пироксен. По данным [Апродов, 1982] Райкоке сложен авгитовыми базальтами.

В работе [Федорченко и др., 1989] приведен химический анализ базальта, отобранного в лавовом потоке на восточном берегу о. Райкоке, и содержание в нем рассеянных элементов.

Распределение бериллия и фтора в породах острова-вулкана Райкоке приводится в работе [Петров и др., 1982].

Содержание редких и радиоактивных элементов в породах, слагающих остров-вулкан Райкоке, приводится в работах [Леонова, Удальцова, 1970, 1971, 1974; Пузанков и др., 1991], а редкоземельных – в работах [Антонов и др., 1987; Подводный вулканизм ..., 1992]. Необходимо отметить, что в работе [Антонов и др., 1987] при описании содержания Yb допущена опечатка: содержание составляет 3.08 г/т (табл. 1), а не 3.68 г/т.

Концентрация золота в лавах острова-вулкана Райкоке изменяется в диапазоне 1.5–3 г/т при среднем значении 2.07 г/т [Антонов, 2001].

В работе [Подводный вулканизм ..., 1992] приведены средние химический и микроэлементный составы для 8 образцов базальтов и трех образцов андезибазальтов. В цитируемой публикации представлен и анализ одного образца андезита (см. табл. 1).

В вулканитах Райкоке, впервые для Курильских островов, обнаружены оливин-плагиоклаз-амфиболовые включения [Левин и др., 2010].

На острове-вулкане Райкоке 17 сентября 1970 г. и 10 июля 1981 г. 9 образцов были отобраны камчатскими исследователями (см. табл. 1), но анализы 6-ти из них до настоящего времени не были опубликованы.

Образец В11-556 был передан для исследования иностранным коллегам. Данные анализов этого образца, выполненных в отечественных (см. табл. 1) и иностранных лабораториях, не совпадают. В работе [Tomascak et al., 2002] содержание  $\text{SiO}_2 = 55.7\%$ ,  $\text{MgO} = 3.41\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 1.32\%$ , а  $\text{Li} = 11$  ppm; в работе [Dreyer et al., 2010] содержание  $\text{SiO}_2 = 55.7\%$ ,  $\text{Be} = 0.75$  ppm,  $\text{B} = 13.6$  ppm, а  $\text{Nd} = 95$  ppm; в работе [Ishikawa, Tera, 1997] содержание  $\text{SiO}_2 = 55.67\%$ ,  $\text{B} = 17.4$  ppm,  $\text{Nb} = 2.14$  ppm. Соотношение  $\text{Be/B}$  в работе [Dreyer et al., 2010] = 18.2, а в [Tomascak et al., 2002] = 19.6. Изотопные отношения для образца В11-556  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be} = 12.4$ , а  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513037$  [Dreyer et al., 2010].

Обобщив все доступные материалы по составу пород, слагающих остров-вулкан Райкоке [Апро-

дов, 1982; Богоявленская и др., 1966; Гущенко, 1979; Мартынов и др., 2015; Подводный вулканизм ..., 1992; Федорченко и др., 1989; Горшков, 1967; Леонова, Удальцова, 1970, 1971, 1974; Мархинин, 1965; Мархинин Стратула, 1965; Dreyer et al., 2010; Ishikawa, Tera, 1997; Tomascak et al., 2002], можно сказать, что он сложен умеренно-калиевыми породами средней щелочности толеитовой серии от базальтов до андезитов. По микроэлементным отношениям (высокое  $\text{Th/Yb}$ ,  $\text{Ba/Yb}$ , низкие  $\text{Ta/Yb}$ ,  $\text{Ti/V}$ ) эти породы можно рассматривать как типичные островодужные лавы, образовавшиеся в результате плавления надсубдукционной ультраосновной мантии, метасоматически переработанной как низко-, так и высокотемпературным субдукционным компонентом. Расчетные данные указывают на температуру плавления  $1506^\circ\text{C}$  и давление 2.57 ГПа [Мартынов и др., 2015].

### ПОДВОДНЫЙ ВУЛКАН 3.18

Подводный вулкан 3.18 был исследован в нескольких рейсах научно-исследовательского суда (НИС) “Вулканолог” в 1981–1982 гг. [Блох и др., 2020a; Бондаренко и др., 2004; Брусилковский и др., 2004; Подводный вулканизм ..., 1992]. Он располагается на пересечении двух тектонических линий: субмеридиональной, проходящей параллельно прогибу пролива Крузенштерна, и линии, имеющей азимут  $115^\circ$ .

Подводный вулкан был изучен по апробированной эффективной технологии количественной интерпретации материалов гидромагнитной съемки (ГМС) в комплексе с эхолотным промером, НСП, а также анализом петромагнитных свойств и химического состава драгированных горных пород, которая позволила проводить интерпретацию непосредственно по исходным данным, не прибегая к процедуре их предварительного восстановления в узлах регулярной сети [Блох и др., 2020б].

Превышение вулкана 3.18 над дном Охотского моря – 2200–2300 м, а размер основания по изобате 1200 м –  $6 \times 7.5$  км. Привершинная часть, расположенная на глубинах 260–230 м, имеет несколько пиков, а отмеченная минимальная глубина равна 216 м. На глубине ~800 м вулкан сливается основанием с островом-вулканом Райкоке. Крутизна склонов вулкана 3.18, увеличиваясь от подножия к вершине, изменяется от  $16.7^\circ$  до  $24^\circ$ . Объем вулканической постройки ~150 км<sup>3</sup>. В верхней части вулкан имеет довольно правильную конусовидную форму (рис. 4–6а). В северо-восточной и юго-восточной частях подножия выявлены экструзии высотой ~100 м с очень крутыми и неровными склонами (см. рис. 4).

**Таблица 1.** Силикатный (мас. %), редкоэлементный (ppm) и редкоземельный (ppm) составы пород, слагающих остров-вулкан Райкоке

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Обр. №	B11-559	B11-560	B11-563	ФБ-93	B11-556	B11-561	ФБ-83	ФБ-82	ФБ-87
Содержание в мас. %									
SiO <sub>2</sub>	51.12	51.76	52.48	52.55	52.57	52.62	53.40	54.16	59.54
TiO <sub>2</sub>	0.71	0.85	0.84	0.74	0.60	0.72	0.81	0.75	0.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.20	17.73	17.30	18.71	20.53	17.75	19.14	18.74	16.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.67	9.93	4.75	9.23	2.49	1.96	2.87	8.78	2.85
FeO	7.40	5.12	5.12	4.76	5.04	5.84	5.40	4.76	5.26
MnO	0.18	0.17	0.19	0.17	0.16	0.18	0.20	0.17	0.17
MgO	5.81	5.10	5.77	4.58	3.67	6.85	4.04	3.89	3.06
CaO	9.56	10.17	10.64	10.10	9.08	9.52	8.90	8.86	6.64
Na <sub>2</sub> O	2.70	3.16	2.61	3.06	3.60	2.74	3.56	3.52	3.29
K <sub>2</sub> O	1.20	1.17	0.88	1.04	1.35	1.26	1.49	1.23	1.28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.21	0.19	0.17	0.15	0.22	0.27	0.10	0.18	0.15
п.п.п.	0.75	0.04	0.02	0.16	0.43	0.01	0.53	0.00	0.44
Сумма	99.51	100.22	100.55	100.19	99.74	99.70	100.44	100.32	100.24
Содержание в ppm									
Na	2.54	2.12	2.36	2.34	2.84	2.68	2.32	2.58	—
K	1.16	1.02	1.10	0.88	1.21	0.88	0.95	1.00	—
Rb	24	17	26	17	24	19	19	19.4	—
Li	6	6	5	7.7	7	7	7	9.4	—
Ba	280	315	230	250	390	320	300	310	330
Sr	480	555	500	515	600	540	600	620	600
V	495	550	560	—	395	580	300	—	—
Cr	82	59	65	—	28	71	83	—	—
Co	38	34	34	—	25	34	26	—	—
Ni	18	21	38	—	19	37	21	—	—
Cu	155	100	104	—	114	107	110	—	—
Zn	102	85	89	—	83	90	85	—	—
W	0.45	—	—	—	0.48	0.33	—	—	—
Be	0.75	—	—	0.75	0.80	—	0.65	0.80	0.55
B	17	—	—	—	35	—	—	—	—
F	380	—	—	380	250	—	600	480	420
U	—	1.5	—	—	1.04	—	—	—	—
Th	—	2.4	—	—	2.8	—	—	—	—
Nb	3.7	—	—	—	—	2.2	—	—	—
Zr	110	—	—	—	—	105	—	—	—
Hf	2.7	—	—	—	—	3.5	—	—	—
La	9.06	—	—	—	—	—	—	—	—
Ce	21.28	—	—	—	—	—	—	—	—
Sm	3.57	—	—	—	—	—	—	—	—
Eu	1.21	—	—	—	—	—	—	—	—
Tb	0.36	—	—	—	—	—	—	—	—
Yb	3.08	—	—	—	—	—	—	—	—
Lu	0.23	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Анализ 9 и редкоземельные элементы анализа 1 — из работы [Подводный вулканизм ..., 1992]. Остальные анализы выполнены в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО АН СССР и в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО АН СССР. Образцы B11-559, B11-560, B11-563, B11-556, B11-561 отобраны на пляже южного берега о. Райкоке и на его южном склоне, а образцы ФБ-93, ФБ-83, ФБ-82, ФБ-97 — на его восточном склоне.

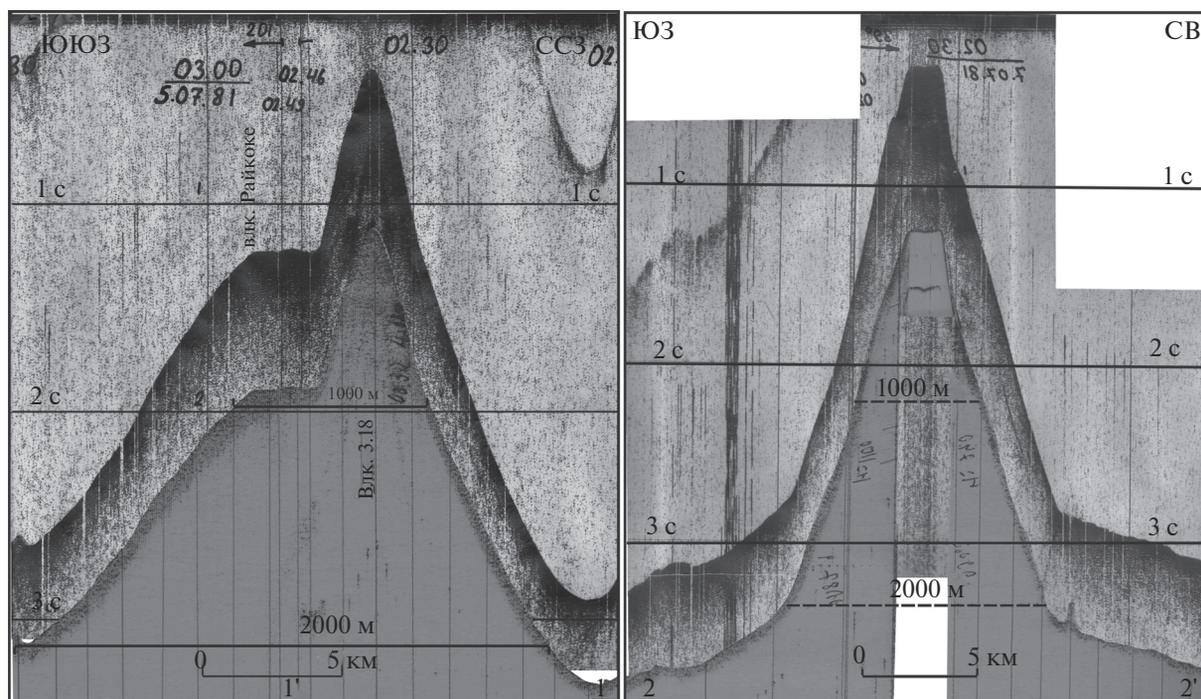


Рис. 4. Фрагменты совмещенных профилей НСП и эхолотного промера, пересекающих подводный вулкан 3.18. Местоположение профилей приведено на рис. 6.

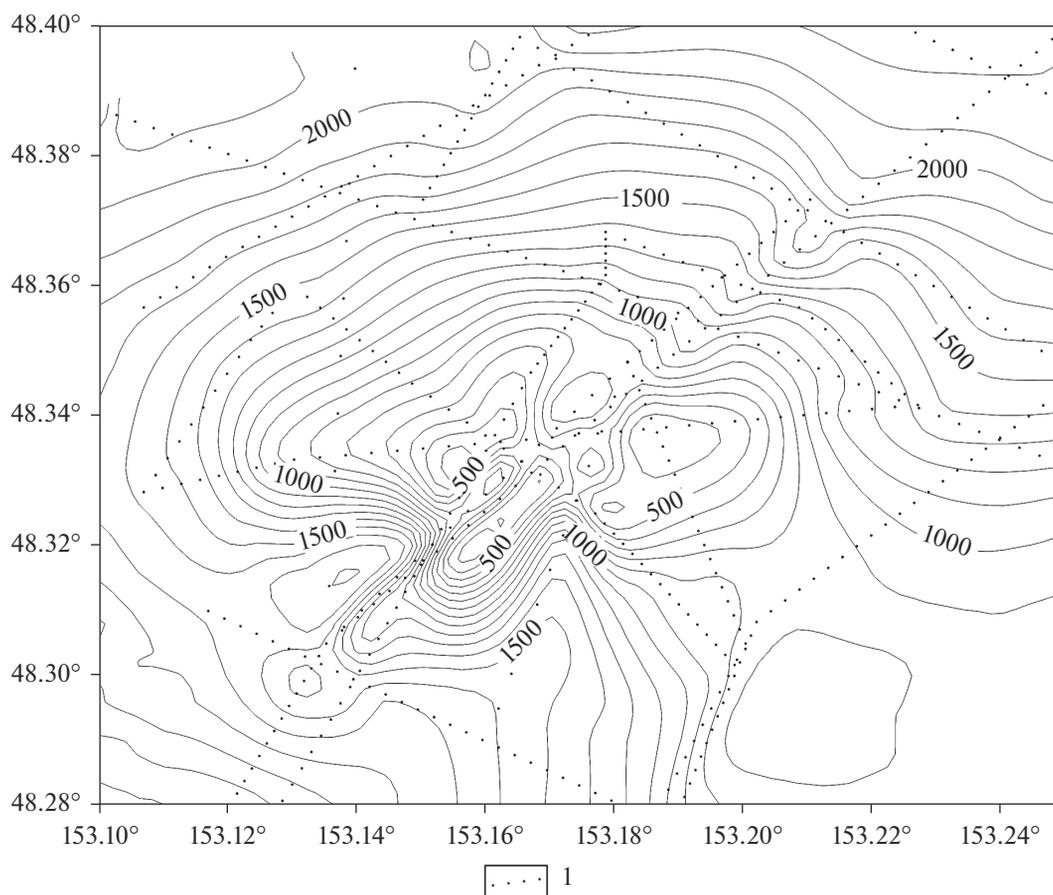
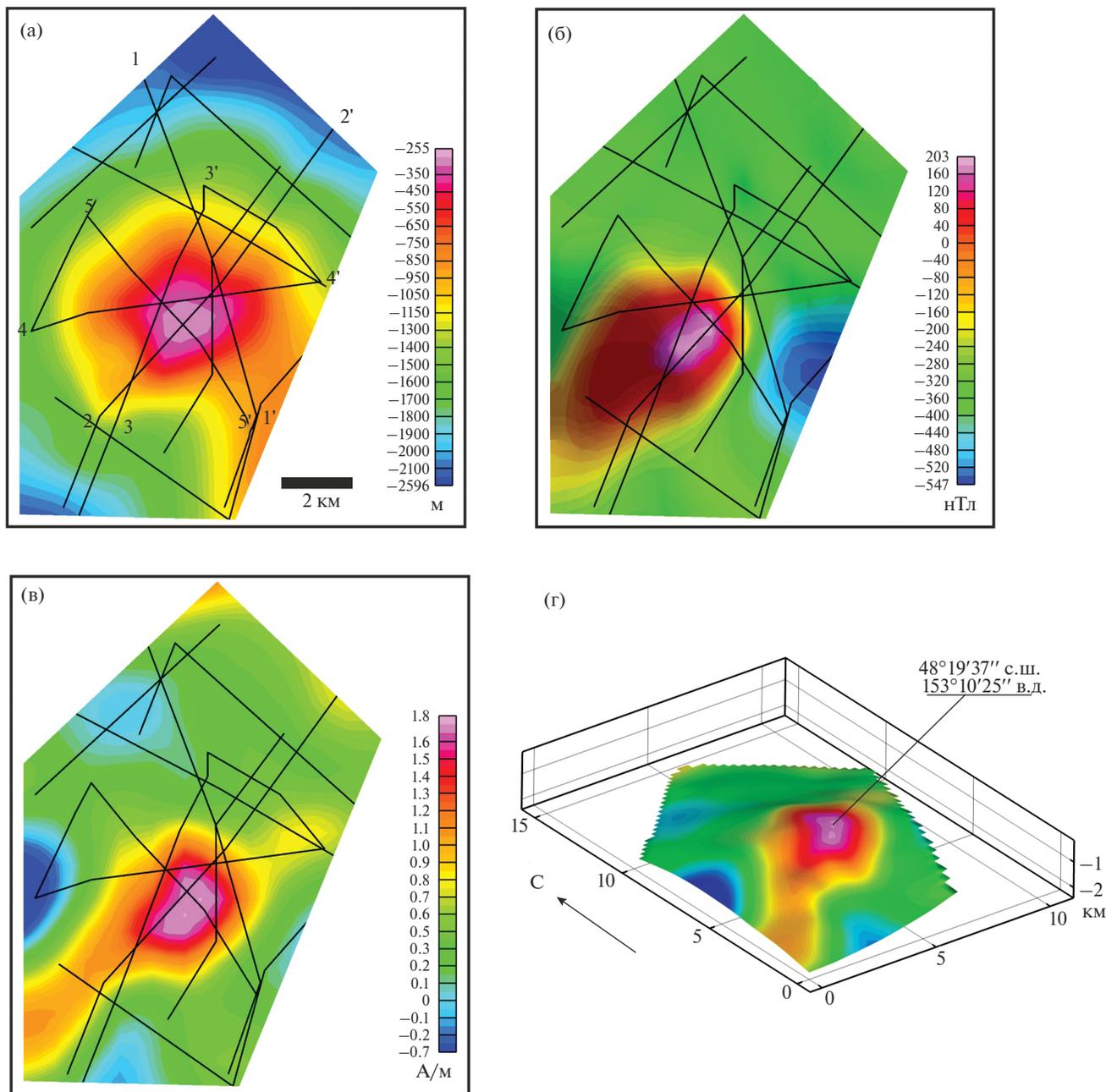


Рис. 5. Батиметрическая карта подводного вулкана 3.18. 1 – промерные профили.



**Рис. 6.** Подводный вулкан 3.18.

а – батиметрия; б – аномальное магнитное поле  $\Delta T_a$ ; в – пространственное распределение эффективной намагниченности  $J_{эф}$ ; г – пространственное распределение эффективной намагниченности  $J_{эф}$ , изображенное на поверхности вулкана. Цифрами обозначены профили, приведенные на рис. 4 и рис. 11.

Необходимо отметить, что в работе [Новейший ..., 2005] допущена опечатка при указании полной высоты вулкана 3.18.

Судя по всему, часть профиля НСП, проходящего через постройку подводного вулкана 3.18, представлена в работах [Ломтев, Патрикеев, 2015а, 2015б].

17 апреля 1982 г. с рыболовецкого сейнера “Славск” колхоза Рыбак Приморского края сообщили по радиотелефону на борт НИС “Вулкано-

лог” о том, что в точке с координатами  $48^{\circ}20.2'$  с.ш. и  $153^{\circ}09.2'$  в.д. сейнер в течение трех минут попал в зону “кипящей воды”, имевшей в свете прожекторов беловатый цвет, характерный для участков подводной вулканической деятельности. Указанное место четко совпало с местоположением подводного вулкана 3.18.

Через 57 ч после получения сообщения НИС “Вулкано-лог” вышло в указанную точку и выполнило геофизическо-гидрохимическую съемку по

системе взаимопересекающихся галсов. Никаких значимых изменений в рельефе по отношению к имеющейся информации, геохимических аномалий и присутствию фумарольной активности обнаружено не было.

Судя по данным НСП (см. рис. 4), конус вулкана 3.18, преимущественно, лавовый. Рыхлые отложения на склонах практически отсутствуют и лишь у подножия появляется маломощный шлейф “акустически мутных” отложений. Мощность их незначительна, менее 0.1 с в масштабе удвоенного времени распространения сигнала. Вероятнее всего, шлейф сложен рыхлыми вулканогенными отложениями или переотложенными продуктами разрушения вершины вулкана, а уплощенная вершина вулкана сформировалась во время позднплейстоценового понижения уровня моря, т.е. возраст вулкана доголоценовый. В то же время практически полное отсутствие осадочных отложений у его подножия свидетельствует об относительно молодом возрасте вулкана. Возможно, он сформировался во время последнего оледенения или незадолго до него.

Уплощенная вершина вулкана в настоящее время находится на глубинах 260–230 м, что более чем на 100 м превышает величину понижения уровня моря в позднем плейстоцене. Возможно, это может говорить о значительном погружении дна моря в голоцене в данном районе. Средняя скорость этого погружения в голоцене должна была превышать 10 мм/год.

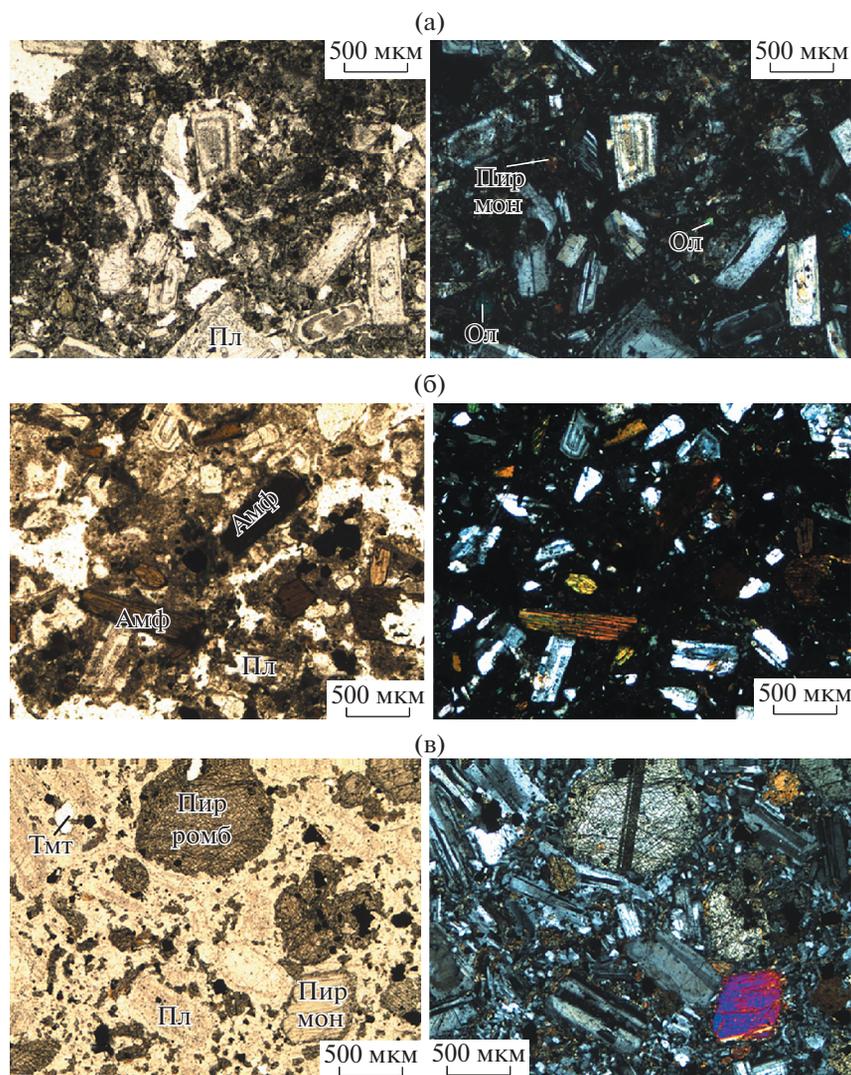
При драгировании привершинной части вулкана в интервале 270–220 м были подняты свежие и измененные двупироксеновые, пироксен-плагиоклазовые, амфибол-двупироксен-плагиоклазовые андезибазальты, пироксен-амфиболовые андезиты и вулканические туфы, туфогравелиты и туфобрекчии. Туфогенные породы соответствуют прикратерным фациям [Подводный вулканизм ..., 1992]. Андезиты и андезибазальты характеризуют лавовые потоки, слагающие более глубокие зоны вулкана. Среди них наибольшим распространением пользуются порфиновые пироксен-плагиоклазовые андезибазальты (рис. 7а). Во вкрапленниках преобладает плагиоклаз (~60%) трещиноватый, зональный, газонасыщенный по зонам роста. Пироксен (~25%) того же размера, редко изменен. Оливин полностью изменен, определяется по форме реликтов кристаллов. Отношение вкрапленники/основная масса = 1/2.

Структура основной массы офитовая. Микролиты плагиоклаза преобладают над микролитами пироксена и рудного минерала. Не исключены микролиты роговой обманки. Все микролиты примерно одного размера и образуют спутано-волокнистый агрегат. Свободного стекла практически нет.

Общее количество рудных образований около 10%. Первичный рудный минерал, главным образом в виде микролитов, присутствует в основной массе. Крупные выделения рудного минерала замещают оливин и образуют каймы вокруг пироксена. Редко наблюдаются включения первичного рудного минерала в плагиоклаз.

Реже встречаются роговообманково-плагиоклазовые андезибазальты с подчиненным количеством пироксена и магнетита (см. рис. 7б). Порода порфировая, слабо сцементированная. Во вкрапленниках: плагиоклаз (~60%) – зональный, насыщенный газовыми включениями и рудной пылью, размер от 0.2 до 1 мм редко до 1.5 мм; роговая обманка (~25%) – свежая, редко отмечается краевая рудная оторочка, наблюдаются рудные включения, размер кристаллов амфибола до 1 мм; пироксен (~10%) – свежий, но сильно трещиноватый, содержит рудные и плагиоклазовые включения. Рудный минерал (~5%) имеет хорошо оформленные не измененные кристаллы размером до 0.5 мм. Отношение вкрапленники/основная масса составляет 1/4. Структура основной массы близка к микродолеритовой. Основная масса насыщена рудной пылью. В минимальном количестве присутствует свободное стекло.

Редко встречаются андезибазальты, которые можно рассматривать как долериты двупироксен-плагиоклазовые с небольшим количеством оливина и единичными кристаллами роговой обманки (см. рис. 7в). Порода практически полностью раскристаллизованная, среднеструктурная, относительно равномернозернистая, структура близка к долеритам. Отношение: крупнокристаллическая часть/интерстиционное заполнение примерно 10/1. Интерстиции между кристаллами иногда заполнены мелкокристаллической основной массой, состоящей из пироксена, плагиоклаза, рудного минерала и очень небольшого количества вулканического стекла. Количественно в породе преобладает плагиоклаз – 55–60%; моноклинный пироксен – 35%; рудный минерал – 5%, ромбический пироксен, оливин и амфибол в сумме – менее 1%, очень мало не раскристаллизованного стекла. Размер кристаллов пироксена и плагиоклаза – от 0.2 до 2 мм, оливина – 0.5–1 мм, амфибола – до 1 мм. Оливин часто разложен, содержит большое количество включений рудного материала, частично замещен слоистым силикатом. Оливин и моноклинный пироксен – наиболее ранние по времени кристаллизации. Моноклинный пироксен не изменен. Плагиоклаз сдвойникован, трещиноват, иногда зонален, загрязнен газовой жидкостью включениями. Роговая обманка не изменена. Рудный минерал сосредоточен в массе, заполняющей интерстиции, а его максимальный размер ~0.4 мм.



**Рис. 7.** Горды, слагающие подводный вулкан 3.18.

а – андезибазальт пироксен-плаггиоклазовый (образец В11-110/6); б – андезибазальт роговообманково-плаггиоклазовый (образец В11-110/8); в – андезибазальт двупироксен-плаггиоклазовый с оливином (образец В11-110/1). Оптический микроскоп, шлиф: слева – съемка без анализатора, справа – съемка с анализатором. Ол – оливин, Пир мон – монклинный пироксен, Пир ромб – ромбический пироксен, Амф – амфибол, Пл – плаггиоклаз, Тмт – титаномагнетит.

Очевидно, что описанные породы и составляющие их минеральные ассоциации принадлежат к разным структурным единицам в строении вулкана. Представляется, что порфировые пироксен-плаггиоклазовые и амфибол-плаггиоклазовые андезибазальты характеризуют лавовые потоки, а равномернозернистые двупироксен-плаггиоклазовые андезибазальты могут представлять дайковые тела. Ассоциации основного плаггиоклаза и пироксена в присутствии оливина указывают на достаточно глубокие очаги как источники формирования лав этого состава. Ассоциация роговых обманок, плаггиоклаза и пироксена более низкотемпературная, возможно, она кристаллизовалась в промежуточном очаге в приповерх-

ностных условиях. Близкая к равномернозернистой, почти лишенная основной массы, структура долеритов позволяет сделать вывод о том, что порода кристаллизовалась в процессе становления силла, дайки или, возможно, в центральной части крупного лавового потока. При этом присутствие зональных плаггиоклазов и пироксенов (рис. 8) свидетельствует о том, что условия кристаллизации этих минералов неоднократно изменялись, причем как в прямую, так и в обратную сторону (например, отдельный кристалл плаггиоклаза имеет следующую смену слоев кольцевой зональности от центра кристалла к краю –  $An_{87} \rightarrow An_{76} \rightarrow An_{80} \rightarrow An_{86} \rightarrow An_{68} \rightarrow An_{71} \rightarrow An_{83} \rightarrow An_{76} \rightarrow An_{59}$ ) (см. рис. 8а).

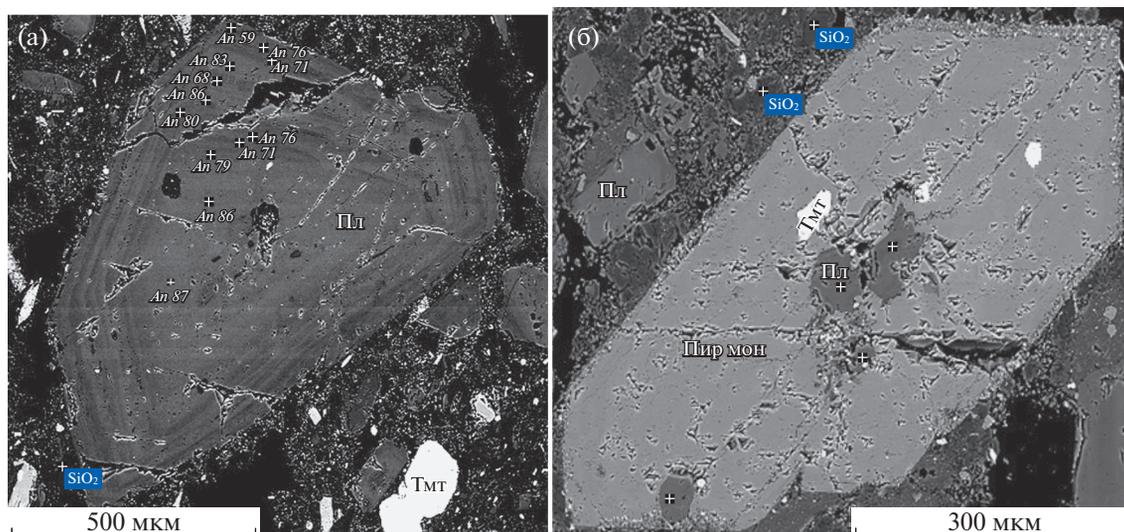


Рис. 8. Зональный плагиоклаз (а) и включение плагиоклаза в кристалл пироксена (б) в образце В11-110/8, драгированном на подводном вулкане 3.18. *An* – анортит. Остальные обозначения см. рис. 7.

Неоднородность вулканитов отражается и в составе титаномагнетита (табл. 2). Максимальное содержание железа и минимальное – титана наблюдается в титаномагнетитах из долеритов, минимальные количества железа и максимальные – титана встречены в одном из потоков роговообманковых лав. Содержание хрома и ванадия в титаномагнетитах из всех типов изучаемых пород примерно одинаково.

Андезитбазальты принадлежат к лавам умеренно-калиевой серии нормального по щелочности ряда (табл. 3). Они характеризуются высокой глиноземистостью, умеренным содержанием Ва, Sr, Rb и низким – Ni и Сг [Подводный вулканизм ..., 1992].

Ввиду того, что при изучении вулкана Райкоке в литературных источниках не указаны горизонты отбора, камчатскими учеными были опробованы средние и нижние горизонты, а на подводном вулкане 3.18 драгирована только привершинная часть, трудно проанализировать высотное распространение пород, слагающих вулканический массив Райкоке. Имеющиеся данные позволяют предположить, что с высотой кислотность пород уменьшается.

Петромагнитные исследования образцов горных пород, отобранных на подводном вулкане 3.18 (по два дубля каждого образца), показали, что породы имеют относительно высокие значения естественной остаточной намагниченности  $J_n$ : у образца № В11-110/6  $J_n \sim 5.3\text{--}5.6$  А/м; у образца В11-110/8  $J_n \sim 1\text{--}1.1$  А/м и магнитной восприимчивости  $\chi$ :  $(17.4\text{--}19) \times 10^{-3}$  ед. СИ и  $(26\text{--}28.3) \times 10^{-3}$  ед. СИ соответственно (табл. 4). Фактор Кёнигсбергера изменяется в диапазоне от 1 до 8.1.

Степень магнитной анизотропии пород достигает 7%.

Ступенчатое изотермическое намагничивание образцов в постоянном магнитном поле характерно для низкокоэрцитивных магнитных минералов. Об этом также свидетельствуют низкие величины коэрцитивной силы ( $B_c = 3.5\text{--}11$  мТл) и остаточной коэрцитивной силы ( $B_{c0} = 9.5\text{--}21.8$  мТл). Объемная концентрация ферромагнетика достигает 0.75%. В данной породе содержатся магнитные зерна различной доменной структуры: от однодоменных до многодоменных со средней степенью окисления (медианное магнитное поле изменяется от 26 до 46.4 мТл).

Проведенный термомагнитный анализ (ТМА) по температурной зависимости намагниченности насыщения в постоянном магнитном поле 0.8 Тл на вибромагнитометре (ОРИОН, Россия) на образце В11-110/6-1 показал, что кривые  $M_s(T)$  нагрева и охлаждения совпадают, обратимы и имеют перегиб в районе  $\sim 530^\circ\text{C}$  (рис. 9).

По данным ТМА, можно сделать вывод, что в образце имеют место устойчивые к нагревам зерна титаномагнетита с низким содержанием Ti ( $x = 0.07$ ), по составу близкие к магнетиту. Возможно, что в этом образце окисление исходного титаномагнетита уже прошло в естественных условиях. Высокие значения естественной остаточной намагниченности обусловлены однодоменной и псевдооднодоменной структурой зерен.

ТМА по температурной зависимости  $M_s(T)$  показал, что для образца В11-110/8-1 кривая нагрева имеет точку перегиба в районе  $\sim 480^\circ\text{C}$  (см. рис. 9). Кривая охлаждения проходит несколько выше, обратима и имеет перегиб в районе  $\sim 550^\circ\text{C}$ .

**Таблица 2.** Рудные элементы в титаномагнетитах (мас. %)

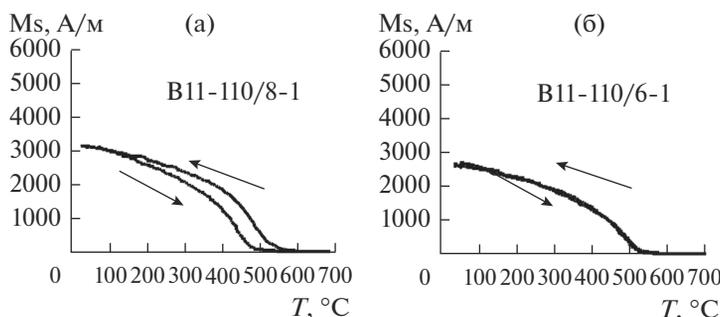
Порода		Андезибазальт					
		двупироксен-плаггиоклазовый с оливином		пироксен-плаггиоклазовый		роговообманково-плаггиоклазовый	
Номер шлифа		В11-110/1		В11-110/6		В11-110/8	
Анализируемый участок шлифа		1	1	2	1	2	3
Количество анализов		11	7	8	17	5	20
$\Sigma\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$	Среднее	81.35	68.10	67.67	74.27	59.89	76.92
	Макс.	85.47	76.07	77.00	79.47	63.46	79.99
	Мин.	75.19	60.54	56.24	65.25	57.04	69.86
$\text{TiO}_2$	Среднее	2.68	11.44	7.98	5.30	27.56	6.09
	Макс.	5.95	14.91	9.06	8.24	31.04	8.48
	Мин.	0.90	9.84	7.46	1.02	21.08	4.64
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	Среднее	0.91	1.41	1.86	0.81	0.33	0.48
	Макс.	2.66	3.61	5.06	3.52	0.85	3.65
	Мин.	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00
$\text{V}_2\text{O}_3$	Среднее	0.77	0.76	0.69	0.52	0.52	0.54
	Макс.	1.07	0.93	7.46	0.74	0.62	0.66
	Мин.	0.53	0.54	0.53	0.40	0.43	0.32

В этом образце основным носителем намагниченности является титаномагнетит  $\text{Fe}_{(3-x)}\text{Ti}_x\text{O}_4$  с содержанием  $\text{Ti}$  ( $x \sim 0.14$ ). Рост намагниченности после прогрева до  $700^\circ\text{C}$  и дальнейшего охлаждения связан с протеканием гетерофазного разложения титаномагнетита на воздухе и образованием бедного по содержанию  $\text{Ti}$  титаномагнетита ( $x \sim 0.04$ ), близкого по составу к магнетиту, и ильменита.

Относительно низкие значения естественной остаточной намагниченности, несмотря на высокую концентрацию ферромагнитных зерен, обусловлены многодоменной структурой зерен.

Судя по данным ГМС, основание вулкана 3.18 окаймлено отрицательной аномалией магнитного поля интенсивностью  $300 \text{ нТл}$ . К вершине постройки приурочена положительная локальная аномалия, в пределах которой отмечены две локальные аномалии с амплитудами более  $200$  и  $300 \text{ нТл}$  (см. рис. 6б). Таким образом, размах аномалии, соответствующей подводному вулкану, равен  $600 \text{ нТл}$ .

Аналитическое продолжение в верхнее полупространство показало, что поле затухает с высотой, изменяясь по своей морфологии. При пересчете на высоту  $1000 \text{ м}$  поле носит явно выраженный дипольный характер, обусловленный,



**Рис. 9.** Кривые температурной зависимости намагниченности насыщения образцов пород подводного вулкана 3.18 в постоянном магнитном поле  $0.8 \text{ Тл}$ . Стрелками обозначен цикл нагрев–охлаждение. а – В11-110/8-1; б – В11-110/6-1.

вероятно, глубинными источниками [Бондаренко и др., 2003; Брусиловский и др., 2004].

С помощью программы ИГЛА установлено, что вектор эффективной намагниченности горных пород  $J_{эф}$  имеет склонение  $93.2^\circ$  и наклонение  $27.6^\circ$  и развернут относительно нормального магнитного поля Земли  $T_0$  на  $71.2^\circ$  (рис. 10), что свидетельствует о приуроченности времени образования подводного вулкана 3.18, как и других вулканов КОД [Блох и др., 2015], к периоду геомагнитных инверсий.

Для уточнения глубинного строения подводного вулкана 3.18 был проведен анализ особых точек функций, описывающих аномальные геомагнитные поля, с помощью интегрированной системы СИНГУЛЯР [Блох и др., 1993]. Эта система позволяет синтезировать результаты локализации особенностей в едином интерфейсе тремя независимыми и хорошо зарекомендовавшими себя на практике методами, разработанными под руководством В.Н. Страхова, В.М. Березкина и Г.А. Трошкова [Березкин, 1988; Страхов и др., 1977; Трошков, Грознова, 1981]. Метод Страхова базируется на аппроксимационном продолжении в нижнюю полуплоскость одного из элементов анализируемого поля. Нами для локализации применялось продолжение самого поля, экстраполяция вниз изолиний которого указывает на местоположение особенностей как точек пересечения изолиний. Метод Березкина основан на построении в нижней полуплоскости нормированной функции. Нами применялся нормированный модуль поля, экстремумы которого, в первую очередь максимумы, отмечают особые точки. Метод Трошкова локализует особенности путем анализа отношения производных в скользящих окнах, а с его помощью удобно определять тип особых точек. Точки первого типа – вершины многоугольников, второго – края тонких пластов, третьего – центры локальных масс. Синтез результатов позволяет оценить устойчивость проводимой локализации.

Выполненный анализ показал приуроченность основных особенностей функций, описывающих аномальные поля, к верхней кромке вулканических пород, а также позволил предположить наличие подводящих каналов субвертикального, северо-восточного и северо-западного направлений и периферических магматических очагов на глубинах 0.6 и 2.2–2.4 км (рис. 11).

Трехмерное моделирование вулканической постройки с помощью пакета структурной интерпретации гравитационных и магнитных аномалий СИГМА-3Д показало, что максимальная эффективная намагниченность подводного вулкана 3.18 составляет 1.8 А/м (см. рис. 6в, г). При этом среднеквадратическая погрешность подбора ано-

**Таблица 3.** Силикатный (мас. %), редкоэлементный (ppm) и редкоземельный (ppm) составы драгированных пород, слагающих подводный вулкан 3.18

№ п/п	1	2	3	4
Обр. №	B11-110/7	B11-110/4	B11-110/6	B11-110/8
Содержание в мас. %				
SiO <sub>2</sub>	53.74	55.88	56.59	57.77
TiO <sub>2</sub>	0.74	0.69	0.70	0.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.88	19.45	19.20	19.43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.50	4.50	2.32	2.20
FeO	2.51	2.39	3.25	3.55
MnO	0.16	0.18	0.12	0.22
MgO	3.72	4.18	3.29	2.47
CaO	9.28	8.07	8.66	8.22
Na <sub>2</sub> O	3.19	2.84	3.67	3.35
K <sub>2</sub> O	1.41	1.41	1.18	1.23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.21	0.21	0.13	0.14
п.п.п.	0.11	0.70	0.53	0.43
Сумма	100.45	99.50	99.64	99.60
S	—	—	0.01	0.04
Содержание в ppm				
Sc	—	—	17	16
V	500	535	171	166
Cr	40	38	82	13
Co	26	22	16	22
Ni	13	33	47	25
Cu	100	30	65	33
Zn	98	82	101	73
Ga	—	—	15	18
As	—	—	2.8	<2.0
Rb	22	26	21	23
Sr	590	570	578	494
Y	—	—	19	17
Zr	—	—	94	80
Nb	—	2.2	2.6	<1.5
Mo	—	—	3.0	<1.5
Th	—	—	3.7	2.4
U	—	—	<2.0	<2.0
Pb	—	—	10	8.6
Ba	290	410	449	388
Li	8	7	—	—
W	0.36	0.36	—	—
Be	0.70	0.50	—	—
B	26	20	—	—
F	380	100	—	—
Hf	—	3.4	—	—
La	—	13.76	—	—
Ce	—	20.93	—	—
Sm	—	3.54	—	—
Eu	—	1.31	—	—
Tb	—	0.15	—	—
Yb	—	2.76	—	—
Lu	—	0.23	—	—

Примечание. Анализы 1 и 2 – из работы [Подводный вулканизм ..., 1992], анализы 3 и 4 выполнены в химической лаборатории Геологического института РАН методом рентгенофазового анализа (зав. лабораторией С.М. Ляпунов).

**Таблица 4.** Петромагнитные характеристики драгированных образцов горных пород, слагающих подводный вулкан 3.18

№ п/п	1	2	3	4
Обр. №	В11-110/6-1	В11-110/6-2	В11-110/8-1	В11-110/8-2
$J_n$ , А/м	5.58	5.30	1.04	1.12
$\alpha$ , $10^{-3}$ СИ	17.40	19.00	26.00	28.34
$Q_n$	8.06	7.01	1.01	0.99
$P'$	1.030	1.028	1.073	1.074
$B_{0.5}$ , мТл	46.4		26.0	
$J_{rs}$ , А/м	155.0	226.2	125.0	86.7
$J_s$ , А/м	2800		3200	
$J_{rs}/J_s$	0.055		0.039	
$B_{cr}$ , мТл	9.49		21.77	
$B_c$ , мТл	11.0		3.5	
$B_{cr}/B_c$	3.5		6.22	
Структура	PSD, SD		MD	
$C$ , %	0.64		0.75	

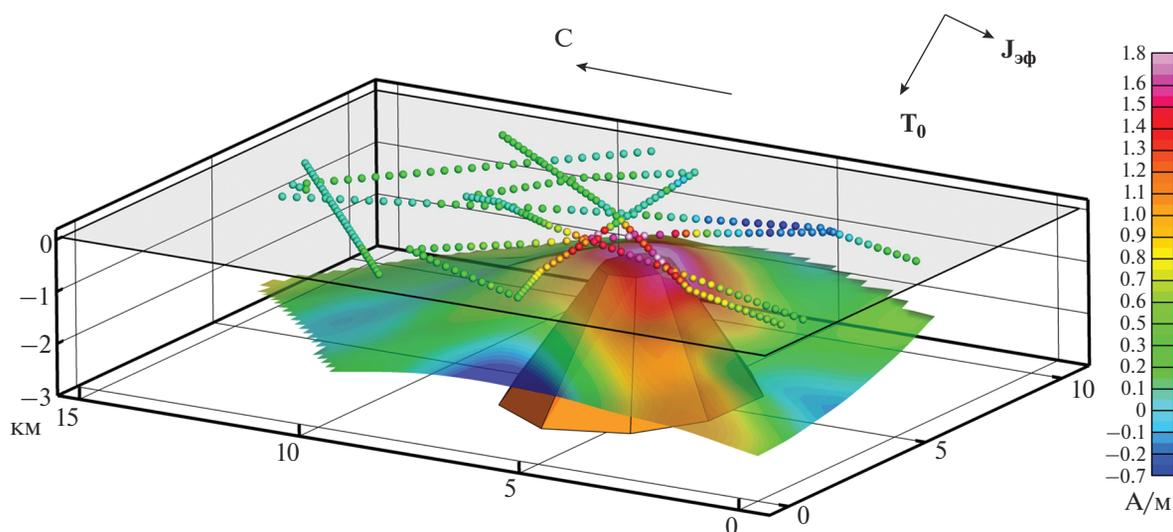
Примечание.  $J_n$  – естественная остаточная намагниченность;  $\alpha$  – магнитная восприимчивость;  $Q_n$  – фактор Кёнигсбергера,  $P'$  – степень анизотропии магнитной восприимчивости;  $B_{cr}$  – остаточная коэрцитивная сила;  $B_{0.5}$  – медианное поле;  $B_c$  – коэрцитивная сила;  $J_{rs}$  – остаточная намагниченность насыщения;  $J_s$  – намагниченность насыщения; PSD – псевдооднодоменные зерна; SD – однодоменные зерна; MD – многодоменные зерна;  $C$  – объемная концентрация ферромагнетика.

мального магнитного поля после 43 итераций оказалась равной 24 нТл [Блох и др., 2020a].

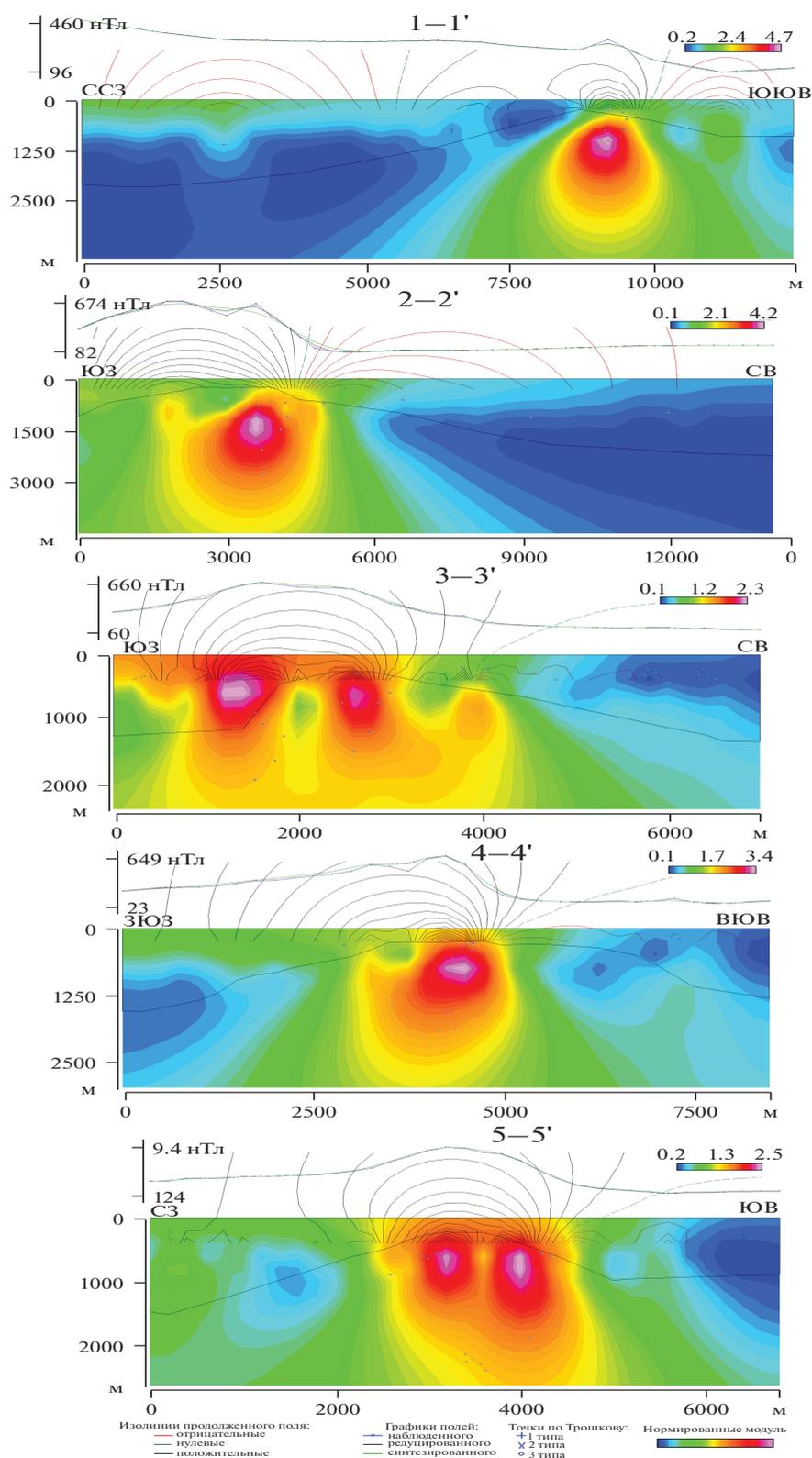
Томографический анализ аномального магнитного поля подводного вулкана 3.18 (рис. 12) по первой производной вертикальной составляющей аномального магнитного поля  $(\partial \Delta T \alpha) / \partial z$  показал две положительные субвертикальные зоны,

прослеживающиеся на значительную глубину (>2 км), и две зоны с меньшей амплитудой, наклонно примыкающие к субвертикальным зонам до глубины 500 м.

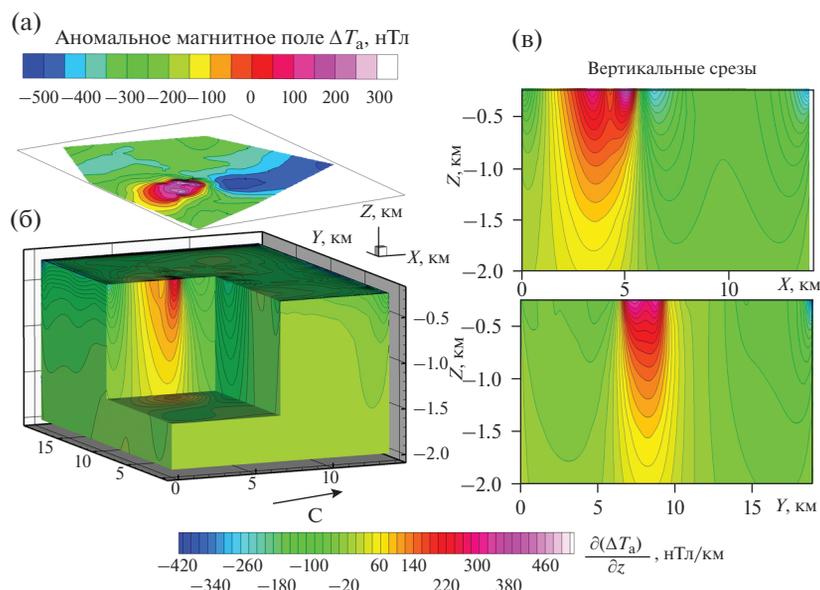
Максимально намагниченной для основных и боковых зон является привершинная часть, а с глубиной намагниченность снижается. Выявлен-



**Рис. 10.** Уточнение направления вектора эффективной намагниченности  $J_{эф}$  подводного вулкана 3.18 с помощью программы ИГЛА.



**Рис. 11.** Изображение, синтезированное системой СИНГУЛЯР для локализации особых точек функции, описывающей аномальное магнитное поле  $\Delta T$  подводного вулкана 3.18, наложенное на рельеф дна. Местоположение профилей приведено на рис. 6.



**Рис. 12.** Томографический анализ аномального магнитного поля подводного вулкана 3.18. Изолинии аномального магнитного поля  $\Delta T_a$  (а), 3D-диаграмма, отражающая пространственное распределение квазинамагниченности горных пород, слагающих постройку подводного вулкана 3.18 (б), и ее вертикальные срезы (в).

ные области, скорее всего, являются подводящими каналами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучен наземно-подводный вулканический массив Райкоке северо-западного простирания в северной части Центральных Курил, состоящий из острова-вулкана Райкоке и четвертичного подводного вулкана 3.18.

Критический анализ собственных оригинальных данных и доступных литературных источников позволил получить реалистичную информацию о строении этого вулканического массива и характере его вулканической деятельности.

Остров-вулкан Райкоке сложен умеренно-калиевыми породами средней щелочности толеитовой серии от базальтов до андезитов, которые можно рассматривать как типичные островодужные лавы. Драгированные в привершинной части подводного вулкана 3.18 андезиты и андезибазальты принадлежат к лавам умеренно-калиевой серии нормального по щелочности ряда. Впервые приведены силикатный и редкоэлементный составы 6-ти образцов горных пород, отобранных на о. Райкоке, и двух образцов, драгированных на подводном вулкане 3.18.

Отсутствие осадочных отложений у подножия вулкана 3.18 свидетельствует об относительно молодом возрасте этого вулкана, привершинная часть которого сложена как свежими, так и измененными андезитами и андезибазальтами. У подножия подводного вулкана 3.18 выявлены экстре-

зии высотой ~100 м с очень крутыми и неровными склонами.

Построена детальная батиметрическая карта подводного вулкана 3.18 и изучены петромагнитные характеристики слагающих его горных пород.

Выполненные исследования позволили предположить, что подводный вулкан 3.18 образовался во время геомагнитной инверсии. В его постройке выделены подводящие каналы субвертикального, северо-восточного и северо-западного направлений, а также периферические магматические очаги.

Анализ имеющейся информации об активности вулкана Райкоке в 2009 и 2019 гг., наличии газовых столбов в основании подводного склона острова, а также сообщения о попадании судов в зоны “кипящей” воды в 1982 и 2019 гг. позволяет сделать вывод, что для вулканического массива Райкоке характерны редкие кратковременные проявления парагазовой активности.

Сделано предположение о том, что возможное подводное извержение 1924 г. если и происходило, то на подводном вулкане 3.18, а не вблизи о. Топорковый, как считали ранее.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-05-00410-А и № 19-05-00654-А).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдурахманов А.И., Ким Чун Ун, Пискунов Б.Н., Федорченко В.И.* Соотношение содержания окиси калия и некоторых других литофильных элементов в лавах вулканов Курильских островов с глубиной до сейсмофокальной зоны // Древние сейсмофокальные зоны. Владивосток: ИТиГ ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 55–77.
- Антонов А.Ю.* Геохимия Au, Ag, Ge, Ga в четвертичных вулканических образованиях Курильской островной дуги // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20. № 2. С. 62–75.
- Антонов А.Ю., Вольнец О.Н., Авдейко Г.П. и др.* Редкоземельные элементы в четвертичных вулканических образованиях Курильской островной дуги в связи с проблемой генезиса островодужных магм // Геохимия магматических пород современных и древних активных зон / Отв. ред. акад. Л.В. Таусон. Новосибирск: Наука, 1987. С. 36–55.
- Апродов В.А.* Вулканы. М.: Мысль, 1982. 367 с.
- Атлас Курильских островов / Гл. ред. Н.Н. Коменчиков. М., Владивосток: ИПЦ “ДИК”, 2009. 516 с.
- Березкин В.М.* Метод полного градиента при геофизической разведке. М.: Недра, 1988. 187 с.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др.* Комплексные исследования подводного вулкана 3.18 (Центральные Курилы) // Материалы 47-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова “Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей”, Воронеж, 27–30 января 2020 г. Воронеж: Издательско-полиграфический центр “Научная книга”, 2020а. С. 37–41.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др.* Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулканического массива Ратманова (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020б. № 2. С. 55–71.  
<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-55-71>
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.* Подводный вулкан Григорьева (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2006а. № 5. С. 17–26.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.* Вулканический массив Алаид (Курильская островная дуга) // Материалы Международного симпозиума “Проблемы эксплозивного вулканизма” к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный, 25–30 марта 2006 г., Петропавловск-Камчатский / Отв. ред. чл.-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006б. С. 135–143.
- Блох Ю.И., Каплун Д.В., Коняев О.Н.* Возможности интерпретации потенциальных полей методами особых точек в интегрированной системе СИНГУЛЯР // Изв. вузов. Геология и разведка. 1993. № 6. С. 123–127.
- Блох Ю.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.* Оценка остаточной намагниченности подводных вулканов Курильской островной дуги с применением программы ИГЛА // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. № 26. С. 5–10.
- Богоявленская Г.Е., Родионова Р.И., Соловьева Н.А., Эрлих Э.Н.* Силикатные анализы вулканических пород Курило-Камчатской вулканической зоны. Курильские острова // Петрохимия кайнозойской Курило-Камчатской вулканической провинции / Под ред. Э.Н. Эрлиха. М.: Наука, 1966. С. 21–72.
- Бондаренко В.И., Брусиловский Ю.В., Иваненко А.Н., Рашидов В.А.* Подводный вулкан, расположенный к северо-западу от острова Райкоке // Материалы II Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии “Вулканизм и геодинамика”. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого, 2003. С. 847–850.
- Бондаренко В.И., Рашидов В.А.* Вулканический массив Черных Братьев (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2003а. № 3. С. 35–51.
- Бондаренко В.И., Рашидов В.А.* О возможной подводной вулканической активности в районе островов Черные Братья (Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003б. № 2. С. 80–88.
- Бондаренко В.И., Рашидов В.А.* Строение вулканического массива Ушишир (Центральные Курилы) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 1. С. 16–34.
- Брусиловский Ю.В., Иваненко А.Н., Рашидов В.А.* Анализ магнитного поля трех позднекайнозойских подводных вулканов в северной части Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2004. № 2. С. 73–83.
- Ганзей К.С.* Ландшафты и физико-географическое районирование Курильских островов. Владивосток: Дальнаука, 2010. 214 с.
- Гирина О.А., Лупян Е.А., Уваров И.А., Крамарева Л.С.* Извержение вулкана Райкоке 21 июня 2019 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 303–307.  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-303-307>
- Горшков Г.С.* Хронология извержений вулканов Курильской гряды (1713–1952 гг.) // Труды Лаборатории вулканологии. 1954. Вып. 8. С. 58–99.
- Горшков Г.С.* Каталог действующих вулканов СССР // Бюлл. вулканол. станций. 1957. № 25. С. 96–178.
- Горшков Г.С.* Действующие вулканы Курильской островной дуги // Молодой вулканизм СССР // Труды Лаборатории вулканологии. 1958. Вып. 13. С. 5–70.
- Горшков Г.С.* Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.
- Горшков Г.С., Мархинин Е.К., Родионова Р.И. и др.* Описание вулканов Курильских островов // Геология СССР / Отв. ред. А.В. Сидоренко, Г.М. Власов, М.Б. Белова. М.: Недра, 1964. Т. 31. С. 581–604.
- Гребенников В.С., Зубачев Д.С., Кошунов В.А. и др.* Наблюдения стратосферного аэрозоля на лидарных станциях РОСГИДРОМЕТА после извержения вулкана Райкоке в июне 2019 года // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 4. С. 272–276.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20200405>
- Гущенко И.И.* Извержения вулканов мира. Каталог. М.: Наука, 1979. 475 с.
- Дегтерев А.В., Чибисова М.В.* Извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. (о. Райкоке, центральные Курильские острова) // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 3. С. 304–309.  
<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309>
- Красникова О.А.* Новое о картах из академического фонда Г.Ф. Миллера // Материалы XXXV Крашенинниковских чтений, посвященных 100-летию со дня рождения Б.П. Полевого, 190-летию Камчатской краевой научной библиотеки им. С.П. Крашенинникова “Знание беспредельно ...”. Петропавловск-Камчатский: ККБУ “ККНБ им. С.П. Крашенинникова”, 2018. С. 112–121.

- Левин Б.В., Мелекесцев И.В., Рыбин А.В. и др. Экспедиция “Вулкан Пик Сарычева-2010” (Курильские острова) // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 151–158.
- Леонова Л.Л., Удальцова Н.И. U, Th, Li, Rb и Cs в вулканических породах Курильских островов и Камчатки // Геохимия. 1970. № 11. С. 1329–1334.
- Леонова Л.Л., Удальцова Н.И. Редкие элементы в вулканических породах Курильских островов // Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания “Вулканизм и глубины Земли”, 28–31 мая 1969 г. М.: Наука, 1971. С. 178–181.
- Леонова Л.Л., Удальцова Н.И. Геохимия урана и тория в вулканическом процессе на примере Курило-Камчатской провинции. Новосибирск: Наука, 1974. 103 с.
- Ломтев В.Л. К строению и газоносности кайнозойского чехла северного фланга Срединно-Курильского прогиба (по данным НСП) // Глубинная нефть. 2014. Т. 2. № 6. С. 953–968. <http://www.deerpoil.ru/e-journal/6-2014/>
- Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Новые черты строения подводных конических гор и холмов у подножия Охотской окраины Курильской дуги (по данным НСП) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015а. № 1. С. 32–45.
- Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Новое в строении подводных конических гор и холмов у подножия Охотской окраины Курильской дуги (по данным НСП) // Вулканология и сейсмология. 2015б. № 2. С. 44–45.
- Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Дегтерев А.В. и др. Геохимическая эволюция вулканизма о. Матуа (Центральные Курилы) // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 1. С. 13–24.
- Мархинин Е.К. Роль вулканизма в формировании земной коры на примере Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 255 с.
- Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Некоторые новые данные о вулканизме Курильских островов // Четвертичный вулканизм некоторых районов СССР. М.: Наука, 1965. С. 11–28.
- Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Некоторые петрологические, геохимические и геофизические аспекты связи вулканизма с глубинами Земли // Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания “Вулканизм и глубины Земли”, 28–31 мая 1969 г. М.: Наука, 1971. С. 11–16.
- Мельников Д.В., Ушаков С.В., Гирина О.А., Маневич А.Г. Формирование новых озер в Активной воронке Мутновского вулкана и кратере вулкана Райкоке // Материалы XXIII Региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога / Под ред. А.Ю. Озерова. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 42–44.
- Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2005. 604 с.
- Петров Л.Л., Вольнец О.Н., Пампура В.Д., Пополитов Э.И. Распределение бериллия и фтора в четвертичных вулканиках Курило-Камчатской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 12–21.
- Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Ю.М. Пушаровский. М.: Наука, 1992. 528 с.
- Полонский А. Курилы // Записки Императорского Русского географического общества по отделению этнографии. СПб.: Типография Майкова, 1871. Т. 4. 208 с.
- Пузанков Ю.М., Вольнец О.Н., Авдейко Г.П. и др. Геохимия микроэлементов в четвертичных вулканиках Курильской гряды. Радиоактивные элементы // Геохимические ассоциации редких и радиоактивных элементов в рудных и магматических комплексах. Новосибирск: Наука, 1991. С. 81–97.
- Рашидов В.А. Побочный вулкан Такетоми (о. Атласова, Курильская островная дуга) // Геофизические процессы и биосфера. 2013а. № 1. С. 5–13.
- Рашидов В.А. Уникальный побочный вулкан Такетоми. Россия, Курильская островная дуга, о. Атласова // Сборник научно-популярных статей – победителей конкурса РФФИ 2012 г. Вып. 16 / Под ред. чл.-корр. РАН В.А. Шахнова. М.: Молнет, 2013б. С. 264–273.
- Рашидов В.А., Гирина О.А., Озеров А.Ю., Павлов Н.Н. Извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) в июне 2019 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 2. Вып. 42. С. 5–8. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-5-8>
- Рудич К.Н. Вдоль огненной гряды. М.: Наука, 1978. 127 с.
- Рыбин А.В., Чибисова М.В. Эксплозивное извержение вулкана Пик Сарычева в июне 2009 г. // Вестник Сахалинского областного краеведческого музея. 2011. № 1(17). С. 280–302.
- Рыбин А.В., Чибисова М.В., Коротеев И.Г. Проблемы мониторинга вулканической активности на Курильских островах // Вестник ДВО РАН. 2010. № 3. С. 64–71.
- Сноу Г.Дж. Курильская гряда // Записки Общества изучения Амурского края. Владивосток: Типография Н.В. Ремизова, 1902. Т. 8. Вып. 1. 119 с.
- Соловьев А. Курильские острова. М.: Изд-во Главсевморпути, 1945. 195 с.
- Страхов В.Н., Григорьева О.М., Ланина М.И. Определение особых точек двумерных потенциальных полей // Прикладная геофизика. 1977. Вып. 85. С. 96–113.
- Трошков Г.А., Грознова А.А. Математические методы интерпретации магнитных аномалий. Л.: Недра, 1981. 151 с.
- Трухин А.М. Остров Райкоке и его обитатели // Природа. 2008. № 6. С. 33.
- Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 237 с.
- Федорченко В.И., Шилов В.Н. Некоторые особенности четвертичных вулканов Курильских островов и их связь с глубинными процессами // Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания “Вулканизм и глубины Земли”, 28–31 мая 1969 г. М.: Наука, 1971. С. 16–24.
- Фирстов П.П., Попов О.Е., Лобачева М.А. и др. Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) 21–22 июня 2019 г. // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4. № 1. С. 71–81. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.071-081>
- Чибисова М.В., Рыбин А.В., Дегтерев А.В. Спутниковый мониторинг вулканической активности на Курильских островах // Труды Седьмой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, 29 сентября–5 октября 2019 г. Петропавловск-Камчатский, 2019. <http://emsd.ru/conf2019lib/pdf/mon/chibisova.pdf>
- Dreyer S.M., Morris J.D., Gill J.B. Incorporation of Subducted Slab-derived Sediment and Fluid in Arc Magmas: B–Be–10Be–eNd Systematics of the Kurile Convergent Margin, Russia // J. Petrology. 2010. V. 51. № 8. P. 1761–

1782.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/egq038>
- Hyman D.M., Pavolonis M.J.* Probabilistic retrieval of volcanic SO<sub>2</sub> layer height and cumulative mass loading using the Cross-track Infrared Sounder (CrIS) // *Atmospheric Chemistry and Physic.* 2020.  
<https://doi.org/10.5194/amt-2020-41>
- Hedelt P., Efremenko D.S., Loyola D.G.* Sulfur dioxide layer height retrieval from Sentinel-5 Precursor/TROPOMI using FP\_ILM // *Atmospheric Chemistry and Physic.* 2019.  
<https://doi.org/10.5194/amt-12-5503-2019>
- Ishikawa T., Tera F.* Source, composition and distribution of the fluid in the Kurile mantle wedge: Constraints from across-arc variations of Br–Nb and B isotopes // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. V. 152. Iss. 1–4. P. 123–138.
- McGimsey R.G., Neal Chr. A., Girina O.A. et al.* 2009 Volcanic Activity in Alaska, Kamchatka, and the Kurile Islands – Summary of Events and Response of the Alaska Volcano Observatory. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2014. 125 p.
- McMinn D.* 9/56 Year Cycle: Panics, Earthquakes, Hurricanes and Volcanoes // *New Concepts in Global Tectonics Newsletter.* 2012. № 64. P. 7–18.
- Muser L.O., Hoshyaripour G.A., Bruckert J. et al.* Particle Aging and Aerosol–Radiation Interaction Affect Volcanic Plume Dispersion: Evidence from Raikoke Eruption 2019 // *Atmospheric Chemistry and Physic.* 2020.  
<https://doi.org/10.5194/acp-2020-370>
- Newhall C.A., Self S.* The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. № C2. P. 1231–1238.
- Sapper K.* *Vulkankunde.* Stuttgart: I. Engelhorn's Nachf., 1927. 424 p.
- Simkin T., Siebert L.* *Volcanoes of the World* // Geosciences Press, Inc. Tusson, Arizona, 1994. 349 p.
- Tanakadate H.* The volcanic activity in Japan during 1914–1924 // *Bull. Volcanol.* 1925. V. 1. Iss. 3. P. 3–19.
- Tanakadate H.* Morphological Development of the Volcanic Islet Taketomi in the Kuriles // *Proc. of the Imperial Academy.* 1934a. V. 10. № 8. P. 494–497.
- Tanakadate H.* Volcanic activity in Japan during the period between June 1931 and June 1934 // *Jpn. J. Astron. Geophys.* 1934b. V. 12. № 1. P. 90.
- Tomascak P.B., Widom E., Benton L.D. et al.* The control of lithium budgets in island arcs // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 196. Iss. 3–4. P. 227–238.  
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00144-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00144-1)
- Ugolnikov O.S., Maslov I.A.* Clouds and aerosol in stratosphere and mesosphere: polarization analysis and trends in the beginning of 21st Century “Physics of Auroral Phenomena”, 2019 // *Proc. XLII Annual Seminar, Apatity, 2019.* P. 159–163.  
<https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.159-163>

## The Raikoke Volcanic Massif (Kuril Island Arc)

**Yu. I. Blokh<sup>1,\*</sup>, V. I. Bondarenko<sup>2</sup>, A. S. Dolgal<sup>3</sup>, P. N. Novikova<sup>3</sup>,  
 V. V. Petrova<sup>4</sup>, O. V. Pilipenko<sup>5</sup>, V. A. Rashidov<sup>1,6,\*\*</sup>, and A. A. Trusov<sup>7</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,  
 bulv. Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

<sup>2</sup>*Nekrasov State University, 1 Maya str., 16, Kostroma, 156961 Russia*

<sup>3</sup>*Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Sibirskaia str., 78a, Perm, 614007 Russia*

<sup>4</sup>*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

<sup>5</sup>*Shmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,  
 Bol'shaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

<sup>6</sup>*Far East Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,  
 prosp. 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022 Russia*

<sup>7</sup>*JSC “GNPP “Aerogeofizika”, Pokhodny proezd, 19, Moscow, 125373 Russia*

\*e-mail: [yuri\\_blokh@mail.ru](mailto:yuri_blokh@mail.ru)

\*\*e-mail: [rashidva@kscnet.ru](mailto:rashidva@kscnet.ru)

The land-underwater volcanic massif Raikoke was studied. It is located in the northern part of the Central Kuriles, consisting of the island-volcano Raikoke and the quaternary submarine volcano 3.18. The volcano eruption in June 2019 suffered great losses to the Raikoke flora and fauna, once again changing its shape, and a lake appeared in the volcano crater. The Raikoke volcano island is composed of moderate potassium rocks of medium alkalinity of the tholeiite series from basalts to andesites, which are typical island arc lavas. For the first time data on the composition of 6 samples taken on it are published. Underwater volcano 3.18 at a depth of near 800 m merges with the base of island-volcano Raikoke. The ridge-top part, located at depths of 260–230 m, has several peaks; extrusions were revealed in the northeastern and southeastern foot parts. Volcano 3.18 is composed of andesite basalts and andesites. Andesite basalts belong to the moderate-potassium series of normal alkalinity lavas. The performed studies allowed us to assume that underwater volcano 3.18 was formed during the geomagnetic reversal. Supply channels and peripheral magma chambers were distinguished in its structure.

**Keywords:** Raikoke volcanic massif, underwater volcano 3.18, Central Kuriles