

УДК 551.21+581.524.323

ЭКСПЛОЗИВНОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ ОСТРОВА-ВУЛКАНА РАЙКОКЕ (КУРИЛЫ) в 2019 г.: ПИРОКЛАСТИЧЕСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РЕЛЬЕФ И ЭКОСИСТЕМЫ

© 2021 г. С. Ю. Гришин^{а, *}, А. Б. Белоусов^{б, **}, М. Г. Белоусова^б,
А. Аuer^{с, ***}, И. А. Козырев^б

^аФедеральный научный центр Биоразнообразия ДВО РАН,
просп. 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022 Россия

^бИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульв. Пийина, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^сShimane University, Matsue, Japan, Yamashiro-cho 698-1, Matsue city, Shimane Prefecture, 690-0031 Japan

*e-mail: grishin@biosoil.ru

**e-mail: belousov@mail.ru

***e-mail: auer@riko.shimane-u.ac.jp

Поступила в редакцию 11.12.2020 г.

После доработки 16.02.2021 г.

Принята к публикации 17.06.2021 г.

В июне 2019 г. на небольшом острове-вулкане Райкоке, расположенном в центральной части Курильской дуги, произошло короткое, но сильное эксплозивное извержение, кульминационная стадия которого продолжалась 3.5 ч, высота пеплового облака достигла 13 км. Анализ серии спутниковых изображений в сочетании с наземными исследованиями позволили охарактеризовать пирокластические отложения извержения и определить масштаб их воздействия на экосистемы острова. Установлено, что извержение имело фреатомагматический субплинианский—плинианский характер. Фреатомагматический механизм извержения обеспечивался взаимодействием поднимающейся андезибазальтовой магмы с подземными водами, которые были представлены, в основном, морской водой, просачивавшейся извне через проницаемые породы острова-вулкана. В процессе извержения образовались многочисленные пирокластические потоки. Горячие отложения пирокластических потоков и тефры покрыли всю территорию острова, уничтожив растительный покров, места гнездования птиц и лежбище морских животных. Большой объем пирокластики отложился в виде конусов выноса пирокластических потоков у подножия вулкана, существенно отодвинув в море береговую линию. В результате площадь острова увеличилась на 15%. В течение первого года после извержения рыхлые пирокластические отложения интенсивно размывались и перетлагались, формируя новые участки побережья острова. Перспективы восстановления экосистем Райкоке связаны с эрозией вулканического субстрата, постепенным заселением острова птицами и заносом на него новых видов растений. Сукцессию ускоряют фрагменты уцелевшей растительности. В целом, для природы острова характерны периодические глубокие разрушения экосистем в ходе сильных эксплозивных извержений и относительно быстрые процессы восстановления, прерываемые затем новым извержением.

Ключевые слова: Курильские острова, остров Райкоке, извержение, пирокластические отложения, экосистемы

DOI: 10.31857/S0203030621050023

ВВЕДЕНИЕ

Райкоке — небольшой (площадь 4.6 км²) необитаемый и редко посещаемый остров-вулкан, расположенный в центральной части Курильской островной дуги, в 380 км к юго-западу от п-ва Камчатка (рис. 1, 2).

На острове никогда не было постоянных поселений, но в прошлом он часто посещался коренными жителями (айнами) с целью охоты на птиц и

морского зверя. Первое описание вулкана Райкоке и его природы было сделано казачьим сотником Иваном Черным в ходе экспедиции 1766—1769 гг.: "... на острове большая голая сопка, с которой камень разметало по всему острову; травы и корни ... не имеется, ибо наперед всего остров выгорел" (цитируется по [Полонский, 1871, с. 429]). Из этого описания Г.С. Горшков [1954] сделал вывод, что в 1750—1760 гг. на вулкане произошло сильное извержение.

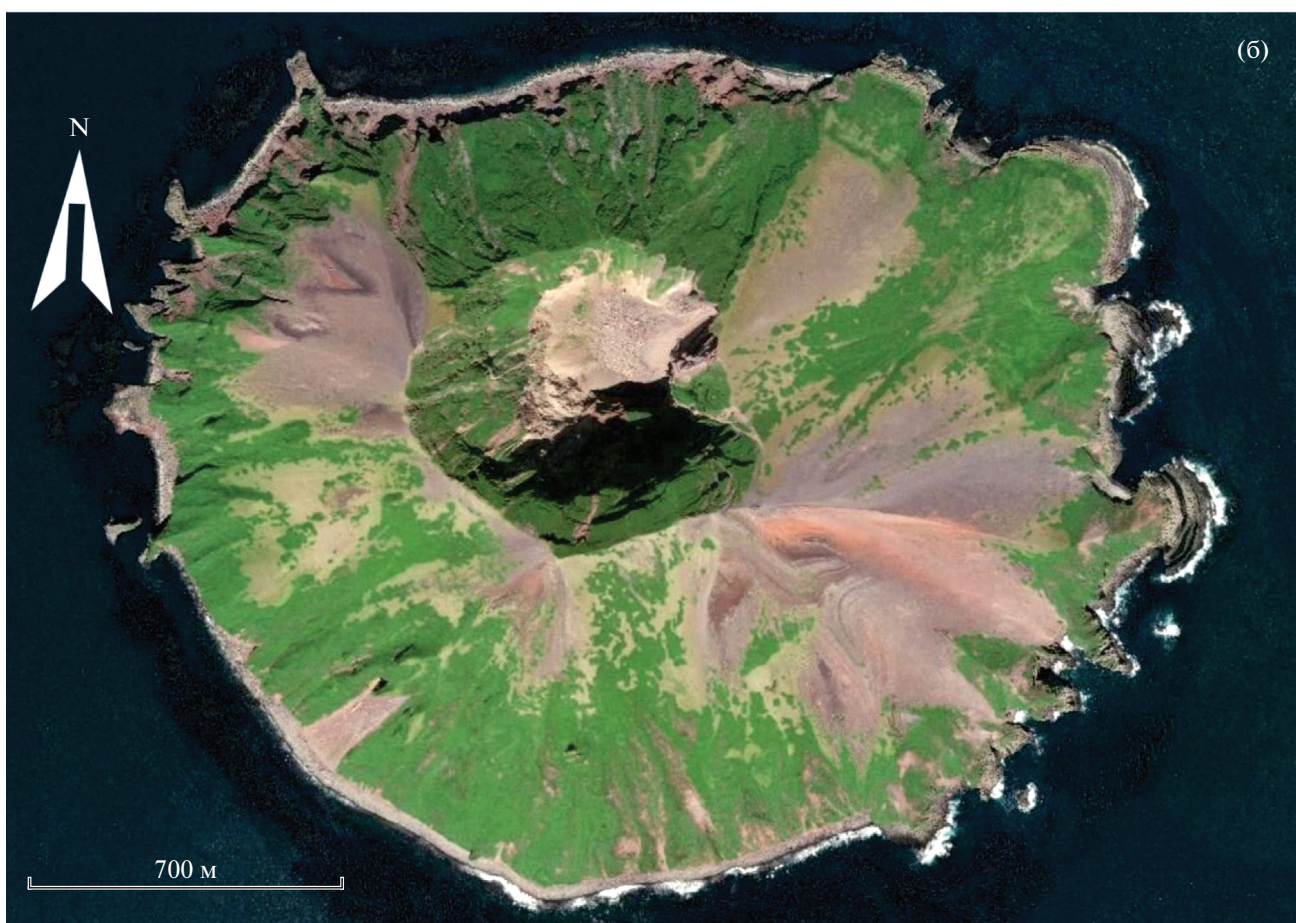
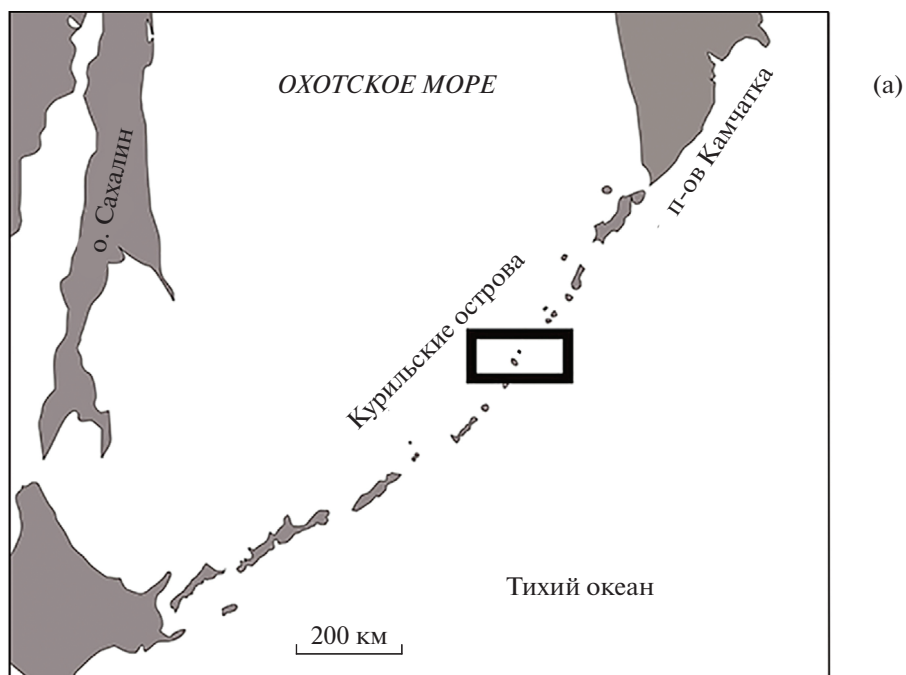


Рис. 1. Географическое положение острова-вулкана Райкоке. В прямоугольнике показано положение о. Райкоке (северный остров) и о. Матуа (к югу от Райкоке) (а); о. Райкоке до извержения 2019 г., снимок со спутника WorldView-2 от 11.07.2018 (б).

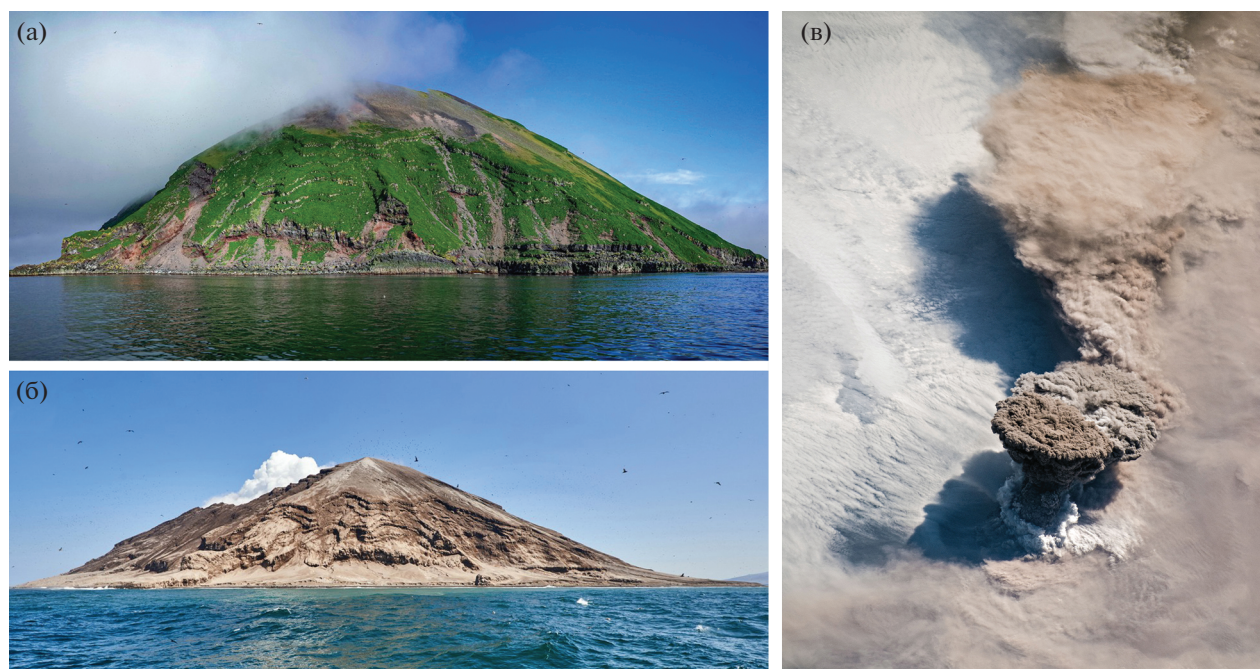


Рис. 2. Вид с северо-запада на остров-вулкан Райкоке до извержения (2016 г.), фото Н.Н. Павлова (а) и после извержения (сентябрь 2019 г.), фото Е.В. Касперского (б). Эруптивная колонна начала субплинианской фазы активности 21 июня 2019 г. в 22:45 UTC; космический снимок (<https://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/photo.pl?mission=ISS059&roll=E&frame=119250>) (в).

Известны также сильные эксплозивные извержения вулкана в 1778 и 1924 гг. В ходе внезапно начавшегося извержения в 1778 г. погибло 15 человек. В 1780 г. сотник Секерин, посланный для инспекции острова после извержения, сделал детальное описание его последствий: “Во время сильного землетрясения в 1778 г., сопровождавшегося возгоранием сопки, вершина ее разселась и треть сопки обрушилась в груды развалин, покрывших весь остров и засыпавших бывшие на них бухты. При новом возгорании ночью еще часть сопки обрушилась и довершила опустошение. Под развалинами ее погиб сотник Черный со своими спутниками, расположившийся здесь ночевать. Сопку сорвало к северу, и верх ее сделался седлом: утесистые залавки песком и камнем засыпало и сделало гладко, что и птицам негде плодиться; байдарную пристань засыпало песком и стало там сухо; лайду с кекурами сделало песчаным берегом; наметало к югу песчаную лайду на 100 сажень длины и 100–110 сажень ширины и сделало 2 маленьких бухты; весь остров покрыт единственно песком, а сопка с ужасом гремит и ныне, но не дымится.” (цитируется по [Полонский, 1871, с. 429–430]).

Почти через 150 лет, 15 февраля 1924 г. произошло следующее извержение. По свидетельству Н. Tanakadate [1931]: “Огромный кипарисообразный столб пепла был замечен с корабля, весь остров был засыпан свежим пеплом. Позже из

кратера выделялось большое количество белых паров”. В результате этого извержения кратер вулкана сильно углубился [Горшков, 1958]. После этого события экосистема острова находилась в состоянии постепенного восстановления.

Вулканологи, посетившие остров в 1962 г., отмечали, что склоны вулкана почти не покрыты растительностью [Мархинин, Стратула, 1965]. Биоту острова в 1996 и 2000 гг. исследовала международная экспедиция [Takahashi et al., 2002]. С начала XXI в. на острове проводились регулярные наблюдения на лежбище морских животных [Трухин, 2008; Burkanov et al., 2011]. На вулкане нет наземной сети инструментального мониторинга, и информация о его состоянии основана преимущественно на анализе спутниковых изображений. Краткосрочное посещение острова в 2010 г. [Дегтерев, Чибисова, 2019] и наши наблюдения 2016 г. не выявили каких-либо признаков вулканической активности. Во время заключительной стадии извержения Райкоке в 2019 г. отрывочные наземные наблюдения были выполнены с проходящего туристического судна “Афина” 23 июня 2019 г. (рис. 3). После извержения Райкоке кратко посещался в июле–сентябре 2019 г. и в июне–июле 2020 г., когда была проведена фото- и видеосъемка, включая съемку с квадрокоптера, зафиксировавшую состояние природы на острове (Н. Павлов, Е. Касперский, К. Буркард и др.). На-

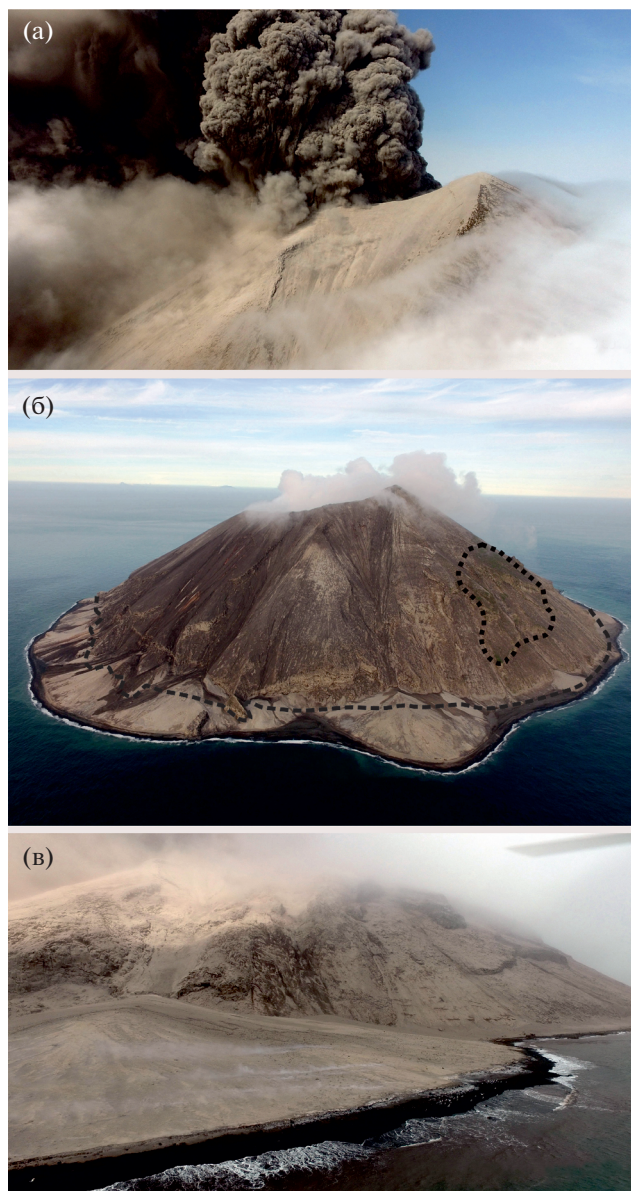


Рис. 3. Кратерная область острова-вулкана Райкоке, пепловое облако заключительной стадии извержения 23 июня 2019 г. в 17:45 (а). Общий вид острова: на северо-западном побережье — новая береговая линия, на юго-западном — крупный конус выноса. Прерывистой линией показано положение берега до извержения 2019 г., точечная линия оконтуривает территорию на склоне с фрагментами уцелевшей растительности, 8 сентября 2019 г. (б). Конус выноса (“песчаная лайда”, по [Полонский, 1871]) горячих отложений пирокластических потоков на юго-западном берегу, 23 июня 2019 г. (в). Фото Н.Н. Павлова.

ши работы на острове Райкоке происходили в 2016 и 2020 гг. в рамках проектов РНФ.

Первые описания извержения [Дегтерев, Чибисова, 2019; Гирина и др., 2019; Рашидов и др., 2019] почти не содержат информации о его про-
дуктах и их воздействии на природу о. Райкоке.

Масштаб изменений и динамика процессов трансформации отложений после извержения были выяснены нами на основе сравнения спутниковых изображений, полученных в период до и после извержения, и в ходе экспедиции на остров в 2020 г.

МЕТОДИКА РАБОТ

Динамика процессов трансформации отложений после извержения была выяснена на основе сравнения серии изображений, полученных со спутников Sentinel-2, Landsat 8, WorldView-1, 2 в период июнь 2019 г.—сентябрь 2020 г. и в период, предшествующий извержению, начиная с 1972 г. Все изученные спутниковые снимки имеют невысокое разрешение, поэтому полученные количественные оценки являются приблизительными.

Полевое изучение и опробование пирокластических отложений извержения 2019 г. было выполнено в июле 2020 г. на восточном побережье острова. Гранулометрический анализ образцов отложений пирокластических потоков был выполнен стандартным методом сухого просеивания [Walker, 1971]. Плотность и вспененность ювенильного андезибазальта были определены для 4 обломков породы размером 2—3 см методом, основанным на законе Архимеда: по разнице веса обломков в дистиллированной воде и в воздухе [Hoblitt, Harmon, 1993]. Перед взвешиванием в воде, для предотвращения ее проникновения в поры, обломки покрывались водоотталкивающим составом на основе силиконового масла, после чего высушивались в сушильном шкафу в течение суток при температуре 60°C. Для подсчета индекса вспененности [Houghton, Wilson, 1989] использовалось значение плотности невспененного андезибазальта 2.7 г/см³.

Определение состава ювенильного материала извержения 2019 г. выполнено на микрозонде JEOL 8530F и спектрометре RIX-2000 (Факультет Геонаук, Университет Симанэ, Япония).

СОСТОЯНИЕ ОСТРОВА ДО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2019 г.

Остров Райкоке высотой 551 м н. у. м. представляет собой верхнюю часть конуса активного стратовулкана, который поднимается на 2500 м со дна восточной окраины Охотского моря [Горшков, 1967] (см. рис. 2а). Склоны вулкана короткие (расстояние от кромки кратера до берега 400—1000 м в плане) и крутые (30° и более). Во многих местах склоны осложнены ступенчатыми обрывами (с уступами до 5 м), обнажающими слоистую толщу лавовых потоков типа “аа”. Мощные фронтальные части потоков выдаются в море на 100—200 м. В нижней части склонов видны ополз-

ни (самый крупный из них имеет длину около 300 м, ширину — до 100 м).

До извержения на склонах вулкана имелись обширные, почти не заросшие осыпи пирокластического материала. Некоторые из них, длиной до 1000 м, тянулись от кромки кратера до береговой линии (см. рис. 16). В центре острова, на вершине вулканического конуса, располагался глубокий (более 400 м) кратер диаметром 700–750 м, косо срезанный на север с падением высоты по кромке на 220 м. Крутые внутренние склоны кратера на его дне переходили в крупноглыбовые развалы и щебнистые осыпи площадью около 0.15 км² (см. рис. 16).

Состояние биоты острова к 2019 г. соответствовало сравнительно короткому (95 лет) периоду неполного восстановления после катастрофического воздействия извержения 1924 г. Спутниковый снимок Landsat, 1972 г. позволил различить на острове вулканогенные пустоши и контуры зеленого цвета, в целом соответствующие распределению растительности перед извержением 2019 г. По данным, собранным в 1996 и 2000 гг., на острове обнаружено 68 видов сосудистых растений [Takahashi et al., 2002]. Доминировала травяная и травяно-кустарниковая растительность, покрывавшая к 2018 г. не менее 60% поверхности внешних склонов вулкана и ~70% внутренних склонов кратера (см. рис. 16). Сомкнутая растительность отмечена у подножия конуса вулкана и на склонах северной экспозиции, где она сформировалась на скалистых выходах древних лавовых потоков. На обширных пустошах и осыпях нижних частей склонов, по данным В.Ю. Баркалова (личное сообщение), начал формироваться моховой покров. Верхние части склонов вулкана были представлены обширными пустошами, не покрытыми или слабо покрытыми растениями. Важной спецификой экосистем острова было огромное количество заселявших его птиц (около 260000), относящихся к 15–16 видам, в том числе самое крупное в Северной Пацифике гнездовое поселение глупыша (*Fulmarus glacialis*) [Трухин, 2008]. Между извержениями на территорию острова эпизодически в небольших количествах поступал вулканический пепел с других вулканов Курильской дуги. Частью природы, окружающей остров, были заросли водорослей в прибрежной полосе шириной от 25 до 350 м: полоса была наиболее узкой на участках, примыкающих к лавовым мысам северо-востока острова, и максимально широкой, с сомкнутыми зарослями, на южном побережье. На побережье западной части острова располагалось лежбище сивучей (*Eumetopias jubatus*, морской лев Стеллера), где была сконцентрирована значительная часть курильской популяции этого вида. По учету, сделанному в 2018 г., там было 474 особи, в том числе 138 щенков [Burkanov et al., 2020].

ИЗВЕРЖЕНИЕ 2019 г. И ЕГО ЭФФЕКТ

Хронология развития извержения реконструирована в работе [Дегтерев, Чибисова, 2019] на основании анализа серии спутниковых снимков, а также в работе [Фирстов и др., 2020] на основании анализа акустических сигналов извержения. Извержение началось 21 июня 2019 г. около 18:00 UTC (22 июня 5:00 утра по местному сахалинскому времени). Начальная стадия извержения (стадия отдельных выбросов) продолжалась 4.5 ч и состояла из 6 выбросов, которые имели продолжительность 20–40 мин и высоту подъема пеплового облака до 10 км н. у. м. В 22:30 UTC началась кульминационная стадия извержения (плинианская стадия непрерывного выброса пирокластики), когда в течение 3.5 ч пепловое облако поднималось до высоты 13 км (см. рис. 2в).

Отложения извержения 2019 г. Малая площадь острова и крутизна его склонов не благоприятствуют накоплению и сохранности пирокластических отложений вулкана Райкоке. Разрезы пирокластических отложений извержения 2019 г. изучены в небольших (высотой 3–8 м) береговых обрывах конусов выноса пирокластических потоков. Толщина отложений в конусах выноса достигает 10–15 м. К моменту изучения, в июле 2020 г. отложения уже полностью остыли, термальных площадок не наблюдалось. В изученных обрывах видно, что конусы выноса состоят из слоев многочисленных (3–5) порций пирокластических потоков, каждый из которых имеет толщину 1–3 м (рис. 4а). Границы между порциями потоков достаточно хорошо выдержаны по простираанию в пределах одного обнажения, но контакты между ними не резкие, а часто постепенные и плохо различимые, что говорит о том, что их отложение происходило в быстрой последовательности, без значительных перерывов во времени. Отдельные порции потоков различаются, в основном, только концентрацией и, в меньшей степени, размерностью входящего в их состав грубообломочного материала (см. рис. 4б). Отложения пирокластических потоков представлены плохо сортированным (коэффициент сортировки Инмана 2–3 “фи”, по [Inman, 1952]) гравийно-песчаным материалом розовато-серого цвета с небольшой примесью более крупных обломков пород поперечником до 10–20 см, иногда до 50 см. Содержание гравийной фракции составляет 35–70%, песчаной 30–60% (рис. 5). Материал отложений заметно уплотнен, но не сцементирован, и легко копается лопатой. Признаков интенсивной дегазации отложений потоков в виде трубок фумарол не найдено, хотя на фотографиях, сделанных сразу после извержения, на поверхности еще горячих потоков видны отдельные выходы пара (см. рис. 3в).

Обломочный материал потоков имеет разнородный петрографический состав. Обломки по-

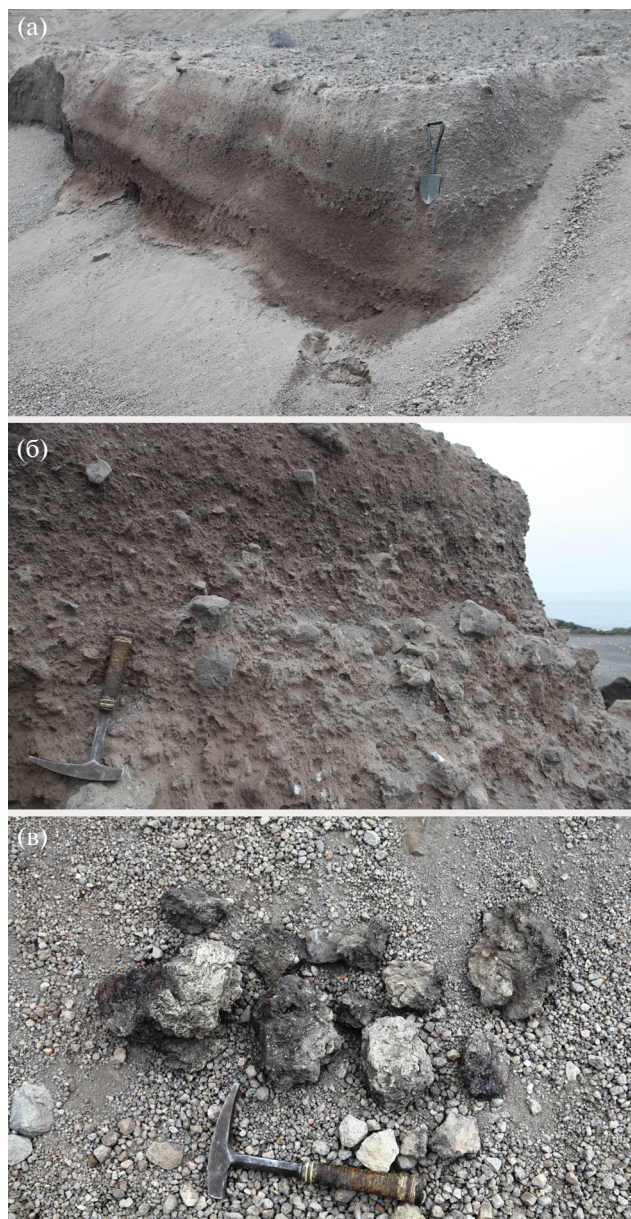


Рис. 4. Пирокластические отложения извержения вулкана Райкоке в июне 2019 г.

Разрез конуса выноса отложений пирокластических потоков, состоящий из трех слоев-порций, образовавшихся в результате коллапса эруптивной колонны фреатомагматического субплинианского извержения 2019 г. (а). Контакт двух порций пирокластических потоков, различающихся концентрацией и размерностью грубообломочного материала (б). Лапили и бомбы шлаковидного андезибазальта магматической стадии извержения (в). Фото А.Б. Белоусова.

род в основном плотные, угловатые и в целом имеют резургентный облик. Некоторые из них окислены и гидротермально изменены. Часть этого обломочного материала была выброшена извержением, а часть эродирована пирокластическими потоками со склонов вулкана. Визуальный

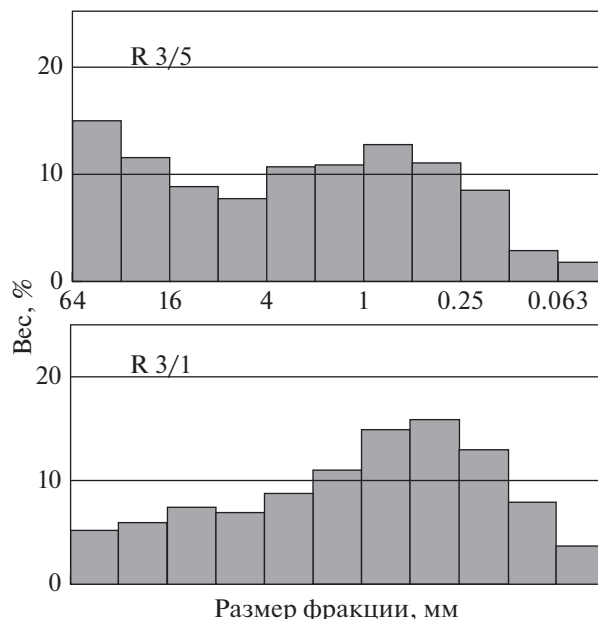


Рис. 5. Гистограммы гранулометрического состава двух порций пирокластического потока (3/1 – нижняя, 3/5 – верхняя).

осмотр позволил выделить три группы пород, которые претендуют на роль ювенильного материала: темно-серые шлаковидные, розовато-серые шлаковидные и светло-серые пемзовидные андезибазальты (рис. 6, табл. 1). Плотность ювенильного материала составляет 1.63–1.81 г/см³, вспененность – 33–40%. Кроме указанных, в пирокластических потоках встречаются округлые обломки большой плотности разнообразных оливинсодержащих крупнокристаллических пород типа кумулатов/алливалитов размером до 5–10 см.

Вне пределов конусов выноса, непосредственно на склонах вулкана пирокластический покров последнего извержения или очень тонок (не более 20–30 см), или вообще отсутствует, а почва содрана и выровнена пирокластическими потоками. Остатки корневых частей растений на эродированной почве не имеют явных признаков обугливания, это означает, что температура пирокластических потоков была не очень высокой, вероятно, не более 200–300°C. На поверхности отложений пирокластических потоков в нескольких местах были встречены участки, покрытые отложениями, которые напоминали грубую тefру плинианского извержения: рыхлый, лишенный мелкозернистого заполнителя, сыпучий наброс лапили (размером 2–5 см) и бомб (размером до 20–30 см) темно-серого шлаковидного андезибазальта (см. рис. 4в, табл. 1).

Реконструкция динамики и механизма извержения. Сопоставление хронологии развития процесса извержения [Дегтерев, Чибисова, 2019;

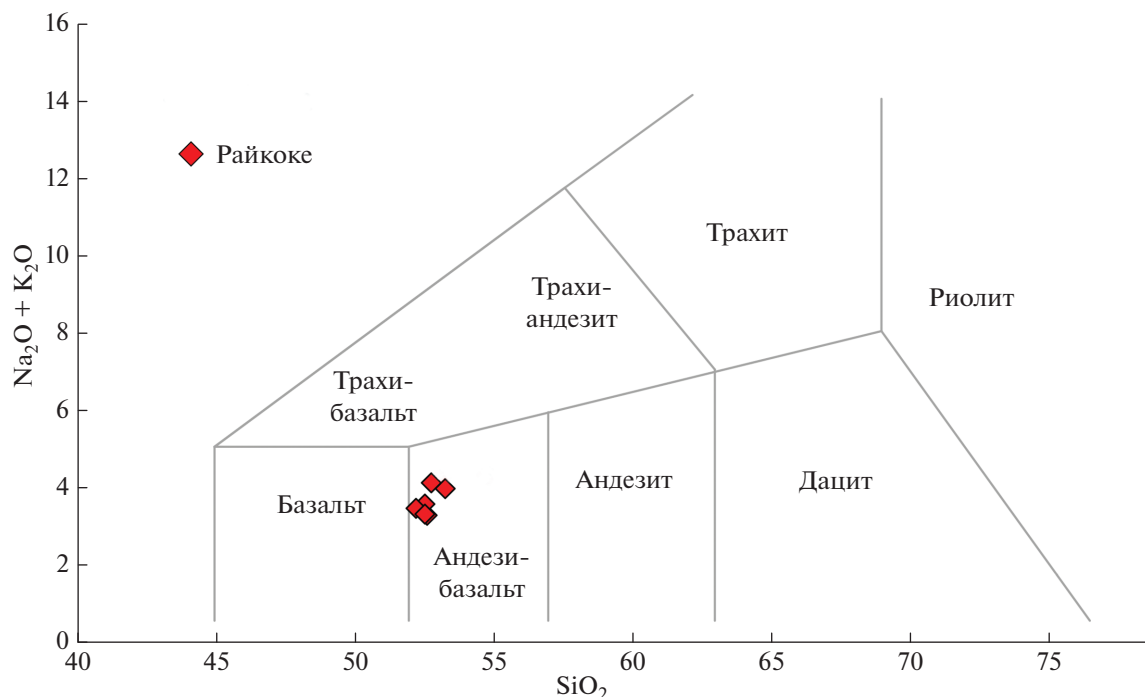


Рис. 6. Химический состав ювенильного материала извержения 2019 г. вулкана Райкоке. Составы и названия типов пород, по [Bas et al., 1986].

Фирстов и др., 2020] с характеристиками изученных пирокластических отложений позволяют сделать следующие выводы об извержении 2019 г. Извержение началось внезапно и сразу приобрело сильный эксплозивный характер. О быстром подъеме магмы из очага свидетельствует наличие в отложениях пирокластических потоков крупных обломков кумулатов большой плотности, что характерно для сильных эксплозивных извержений [Плечов и др., 2008].

Начальная стадия извержения (стадия отдельных вулканических взрывов по [Дегтерев, Чибисова, 2019], с 18:00 до 22:30 UTC 21 июня 2019 г., вероятно, имела фреатомагматический субплинианский характер. Пульсирующая колонна извержения высотой до 10 км была перегружена

мелкозернистой пирокластикой и часто коллапсировала с образованием многочисленных небольших пирокластических потоков, которые двигались радиально от кратера по всем склонам вулкана к морскому побережью и уходили на некоторое расстояние в море. Наибольший объем потоков спускался по имеющимся неглубоким эрозионным рытвинам (барранкосам) на склонах вулкана, в устьях которых сформировались достаточно крупные конусы выноса пирокластики (см. рис. 3б, в). В процессе извержения приток подземных вод, контактировавших с магмой, уменьшился (или прекратился), и на короткое время (3.5 ч) произошел переход к магматическому механизму фрагментации магмы, в результате чего высота эруптивной колонны увеличилась до

Таблица 1. Химический состав ювенильного материала извержения 2019 г. вулкана Райкоке

Образец	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	MnO, %	MgO, %	CaO, %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %	TiO ₂ , %	P ₂ O ₅ , %	Сумма
R-3-6	52.79	17.58	8.87	0.171	4.44	9.37	2.99	1.09	0.698	0.17	98.51
R3-7a	52.64	16.8	8.89	0.169	6.53	11.06	2.38	0.86	0.645	0.13	100.5
R-5-1	53.29	18.39	8.84	0.169	4.79	10.33	2.9	1.03	0.697	0.17	100.5
R-6	52.56	16.61	9.61	0.173	6.52	10.27	2.63	0.9	0.672	0.14	100
R-NN1	52.24	16.67	9.66	0.177	6.69	10.55	2.55	0.87	0.703	0.13	100.6
R-NN2	52.56	16.18	9.31	0.174	6.84	10.8	2.42	0.85	0.655	0.12	100.3

Примечание. R-3-6 и R3-7a — пирокластические потоки, R-5-1 и R-6 — бомбы, R-NN1 и R-NN2 — светло-серый пемзовидный и розовато-серый шлаковидный материал, собранный Н.Н. Павловым 22 июня 2019 г.

13 км. На этой стадии извержения был отложен верхний прерывистый слой грубой тефры и бомб шлаковидного андезибазальта (плинианская стадия по [Дегтерев, Чибисова, 2019], с 22:30 до 2:00 UTC 21–22 июня 2019 г.).

После завершения интенсивной эксплозивной деятельности в кратере в течение нескольких дней происходила слабая эксплозивная, возможно, фреатомагматическая деятельность с выносом небольших облаков тонкого пепла (см. рис. 3а). О фреатомагматическом характере большей части этого извержения свидетельствуют: относительно мелкозернистый гранулометрический состав выброшенной пирокластики, невысокая температура и слабая газонасыщенность отложенных пирокластических потоков, а также большая концентрация резургентных обломков в отложениях и относительно низкая степень вспененности ювенильного материала.

Морфологические изменения острова в результате извержения. Изучение спутниковых снимков показало, что основной объем горячей пирокластики был отложен, преимущественно, на склонах северо-восточного сектора вулкана (рис. 7а). В районе западного побережья острова отложился слой пирокластики толщиной около 1 м (см. рис. 3в). Нижние части склонов и подножие вулкана были перекрыты толщей горячих отложений пирокластических потоков, которые интенсивно парили в первые месяцы после извержения (см. рис. 3в, 8а).

На западе, севере и северо-востоке острова параллельно старой береговой линии сформировалась новая береговая линия, выдвинутая в море на 100–250 м, ее протяженность составила около 5 км (см. рис. 3б, 7а). В юго-восточном секторе на участке длиной около 900 м береговая линия почти не изменилась. На других участках берега в море выдвинулись отдельные конусы выноса пирокластического материала. Крупнейший из них, расположенный на юго-западном берегу, имел в июле 2019 г. длину по береговой линии ~480 м, высоту в основании, у коренного берега ~70 м и выдавался в море на ~250 м (см. рис. 3в).

В целом, в результате извержения площадь острова увеличилась: по измерениям на спутниковом снимке от 29 сентября 2019 г. (см. рис. 7б) — на 0.57 км², а сразу после извержения, вероятно, была несколько больше — около 0.7 км². Эти оценки близки к значениям, полученным в работе [Романюк, Дегтерев, 2020]. Объем материала, отложившегося на острове, новообразованной суше и в море под водой непосредственно вблизи острова, можно оценить в пределах 0.05 км³ (без учета тефры дальнего разноса). В работе [Фирстов и др., 2020] на основе изучения акустических сигналов извержения был оценен общий объем пирокластики, вынесенной извержением, в 0.1 км³,

а его сила по шкале VEI [Newhall, Self, 1982], как равная 4.

Трансформации среды в течение первого года после извержения. В течение первого года происходил интенсивный размыв и переотложение пирокластики вдоль береговой линии острова, преимущественно с запада на восток как вдоль северного, так и юго-западного побережья. Шлейфы замутненной воды были видны на спутниковых снимках на расстоянии более 1 км к юго-востоку от острова.

В результате пляжи западного и северного побережий уменьшились по ширине (см. рис. 7), а высота обнажений свежей пирокластики на северном берегу острова через 3 мес. после извержения была 20–25 м (см. рис. 8в). Расположенные в северо-западной части острова лавовые мысы (см. рис. 1б), которые в ходе извержения были полностью перекрыты отложениями пирокластических потоков (см. рис. 7а, б), в течение года постепенно вновь обнажились (см. рис. 7д). Были размывы и исчезли обширные конусы выноса отложений пирокластических потоков. Так, конус выноса на юго-западном побережье, который в июле 2019 г. выдавался в море на ~250 м (см. рис. 3в, 7б), был полностью размыв за 5 мес. (см. рис. 7в). На его месте, в результате переотложения пирокластики весной—летом 2020 г., сформировался новый пляж протяженностью около 1000 м и максимальной шириной около 250 м (см. рис. 7д, е). На восточной стороне острова небольшие бухты между лавовыми мысами (см. рис. 1б) были заполнены переотложенной пирокластикой; береговая линия, из которой до извержения выступал на 250 м крупный лавовый мыс, сгладилась, стала менее извилистой, а местами линейной (см. рис. 7г—е).

Толща пирокластических отложений на побережье остыла в течение полугода, и на острове зимой 2019–2020 гг. был виден сплошной снежный покров (снимки 20.12.2019 г. (см. рис. 7в), 26.03.2020 г. и 05.04.2020 г.). Но на снимке 02.02.2020 г. (см. рис. 7г) поверхность острова имела бежево-коричневый цвет, такой же, как летом 2019 г. Возможно, что на Райкоке зимой 2019–2020 гг. произошло единичное слабое фреатическое извержение, связанное с взаимодействием воды с еще не остывшими отложениями, или в кратере вулкана произошел крупный обвал с образованием пылевого облака. Через месяц после извержения в кратере в результате просачивания морской воды появилось озеро [Мельников и др., 2020]. Оно четко видно на космическом снимке от 2 августа 2020 г. (см. рис. 7д).

Поражение экосистем. Верхние и средние части склонов были подвергнуты механическому и термическому воздействию выпадающей пирокластики, а сформировавшийся там почвенный и растительный покров в значительной степени со-

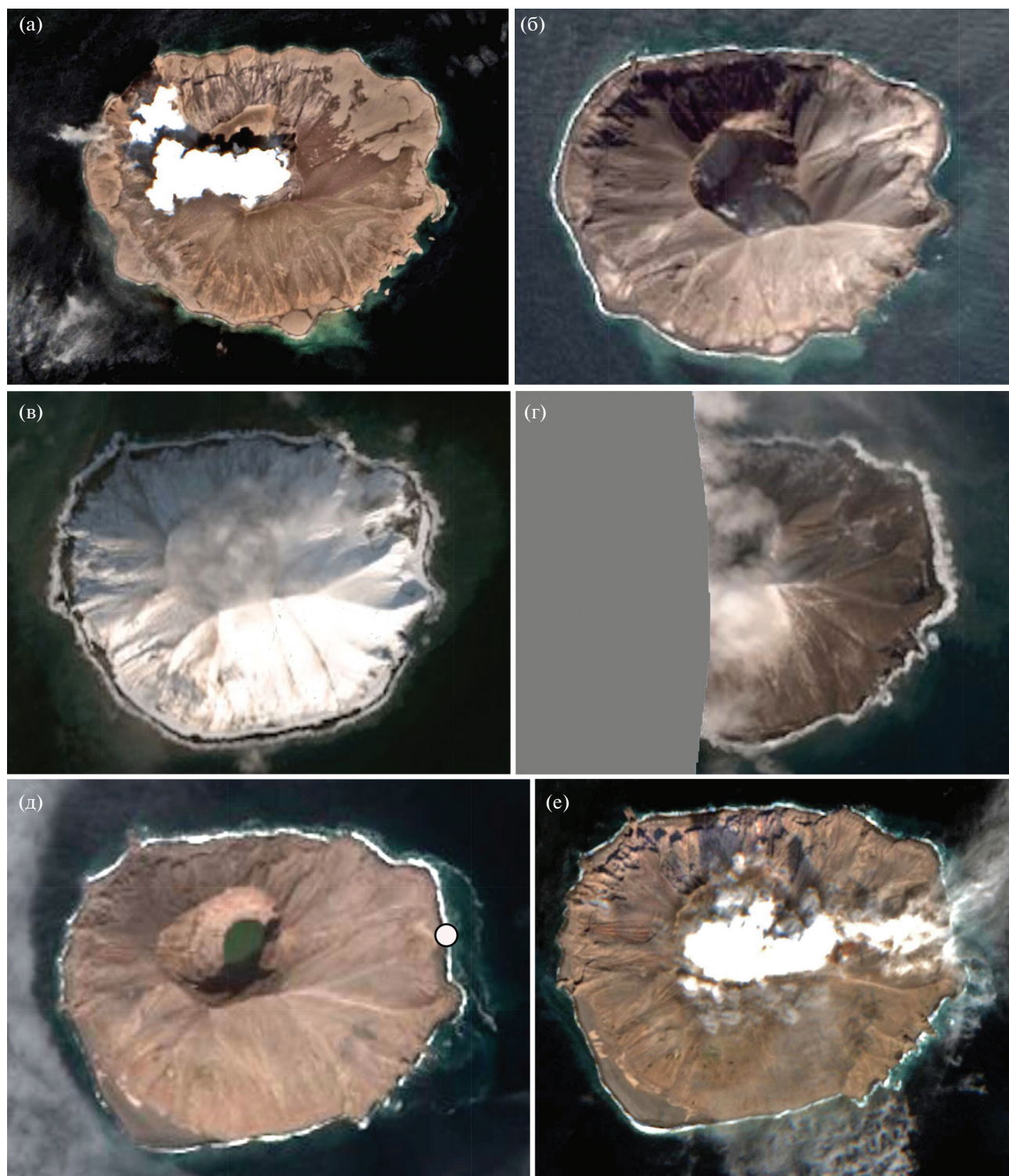


Рис. 7. Серия спутниковых изображений, показывающая изменение формы и размеров полосы отложений в прибрежной зоне в течение года после извержения: 30.06. 2019 (а), 29.09.2019 (б), 20.12.2019 (в), 02.02.2020 (г), 02.08.2020; белой точкой показано место высадки на берег в июле 2020 г. (д), 02.09.2020 (е). Изображения 7а–е — со спутника Sentinel 2, 7б–д — со спутника WorldView-2. Отсутствие части изображения на рис. 7г обусловлено техническими условиями съемки. Примерный масштаб снимков дает поперечный размер острова, который составляет 2 км.



Рис. 8. Лавовый мыс-останец на западном побережье острова 23 июня 2019 г. (а) и в июле 2020 г. (б); участок северного побережья Райкоке в июле 2020 г. (в); участки фрагментарно сохранившейся растительности у основания склонов восточного побережья, июль 2020 г. (г); участок с сохранившимися куртинами злаков и гнездами птиц на восточном побережье острова, июль 2020 г. (д); погребенные пирокластикой водоросли, 23 июня 2019 г. (е). Фото Н.Н. Павлова (а, б, г, е), О.А. Румянцевой (в), А.Б. Белоусова (д).

дран или погребен. В наименьшей степени пострадали нижние части склонов южной половины острова. Сравнение кадров наземной фотосъемки (включая съемку с квадрокоптера), выполненных дважды — в 2019 и 2020 гг., показало, что растительный покров фрагментарно сохранился на нижних частях склонов и скалистых подножиях, где он покрывал не более 5–10% поверхности отдельных участков (см. рис. 8г, д). Наиболее явно это было выражено в восточной и южной половине острова. По профилю южного склона уцелевшие участки растительности, встречаются до высоты 350 м н. у. м., располагаясь на расстоянии около 340 м от кромки кратера (см. рис. 3б). Крупный участок растительности сохранился (хотя, по-видимому, был существен-

но нарушен) на расстоянии 200 м от прежней береговой черты (см. рис. 8г). В целом для острова проективное покрытие уцелевшей растительности составляет менее 1%. Выжившие растения в основном представлены злаком *Leymus mollis* (см. рис. 8д). Разрушительное воздействие было оказано и на лес водорослей в прибрежной полосе: он был погребен пирокластикой, вынесенной в море (см. рис. 8е), и лишь фрагментарно выжил на значительном удалении от берега.

Лежище сивучей на западном побережье было погребено отложениями горячих пирокластических потоков. Согласно учетам 12 июля и 8 сентября 2019 г., было обнаружено всего 35 особей, исключительно самцов, на противоположной стороне острова [Burkanov et al., 2020]. Учеты,

проведенные через год после извержения, показали 164 (18 июня 2020 г.) и 174 (12 июля 2020 г.) особи, включая молодых животных и щенков [Burkanov et al., 2021]. Таким образом, извержение 2019 г. привело к резкому уменьшению островной популяции сивучей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Объем материала извержения 2019 г., отложившегося на острове, новообразованной суши и в море, под водой, непосредственно вблизи острова составил около 0.05 км^3 , а с тефрой дальнего разноса — 0.1 км^3 . По выброшенному объему пирокластики и максимальной высоте эруптивной колонны (13 км), сила извержения по шкале VEI соответствует 4 [Дегтерев, Чибисова, 2019], что ставит это извержение в один ряд с эруптивными событиями Райкоке 1778 г. и 1924 г., которые также классифицированы как VEI 4 [Siebert et al., 2011]. Также как и прошлые исторические извержения, извержение 2019 г. началось внезапно и характеризовалось высокой эксплозивностью, что связано с фреатомагматическим механизмом фрагментации поднимающейся магмы при контакте с подземными водами. Можно предположить, что эти подземные воды были представлены морской водой, просочившейся извне в постройку острова-вулкана. Это предположение основано на том, что после извержения морская вода быстро проникла в углубившийся кратер вулкана, образовав кратерное озеро [Мельников и др., 2020]. Такой механизм, по-видимому, характерен для эксплозивных извержений вулкана Райкоке и, весьма вероятно, будет повторяться в будущем. Вместе с тем, в строении конуса вулкана большую роль играют лавовые потоки типа “аа”, которые, вероятно, изливались, когда доступ/приток подземных/морских вод к магматическому каналу Райкоке был ограничен. Возвращение вулкана к преимущественно эффузивному стилю активности возможно в случае изменения гидрогеологической ситуации в его постройке.

Спецификой острова Райкоке является его малый размер (побережье расположено в пределах всего лишь 0.4–1 км от кратера), поэтому вся его территория подвержена интенсивному воздействию вулканических извержений. Большая крутизна склонов приводит к скатыванию масс пирокластики к подножию вулкана, где они попадают в море и создают новую береговую линию суши, которая затем постепенно, но достаточно быстро размывается морем.

В одной из первых работ, посвященных извержению [Гирина и др., 2019], приводится описание паровых шлейфов белого цвета, видимых на некоторых космических снимках, и сделано предположение об излиянии лавового потока на

склон вулкана, а также об одновременном извержении подводного вулкана 3.18, расположенного на расстоянии 6.5 км к северо-западу от о. Райкоке [Рашидов и др., 2006]. В процессе наших полевых работ на острове и в его окрестностях в 2020 г. никаких следов свежих лавовых потоков и признаков подводного извержения мы не обнаружили. Вероятно, данная интерпретация паровых шлейфов является ошибочной, и они были вызваны вхождением в море пирокластических потоков извержения Райкоке.

Важной особенностью природы острова является постоянный обильный привнос органического вещества в его экосистему (рыба — морские птицы — продукты их жизнедеятельности — почвы — растительность), что существенно ускоряет сукцессию на вулканогенных отложениях. Кроме того, птицы, строя гнезда в рыхлом пирокластическом субстрате, создают неоднородность микрорельефа (см. рис. 8д), благоприятную для заселения растениями. Ускоряют сукцессию и эпизодические небольшие пеплопады соседних вулканов Курильской гряды: например, в июне 2009 г. на Райкоке выпал пепел вулкана Пик Сарычева, долетевший с соседнего о. Матуа (личное сообщение наблюдателя В.В. Черницына, дежурившего на Райкоке).

Цикл трансформации среды на Райкоке, по-видимому, был сходен с процессами, происходившими на о. Матуа после сильного извержения вулкана Пик Сарычева в 2009 г. [Гришин, 2011]. Оба острова, являясь частью Курильской дуги, находятся в 16 км друг от друга (см. рис. 1) и характеризуются близкими природными условиями. При этом первичное приращение территории сразу после извержения на Матуа составило 2–3% от площади острова, тогда как на Райкоке — ~15%. На Матуа мощное отложение пирокластики в море привело к формированию новой суши и фестончатой береговой линии, затем произошло сглаживание новой береговой линии (первые месяцы), размывание и перенос отложений с запада на восток в соседние бухты (первые годы). На склонах вулкана Пик Сарычева, по которым прошли горячие облака пирокластических волн, безжизненность первого года после извержения постепенно сменялась восстановлением малой части уцелевшей, хотя и пострадавшей растительности, преимущественно, травяной. На первичных субстратах началось заселение пионерными растениями. Достаточно быстро (за десятилетие) в прибрежной зоне о. Матуа восстановился и лес водорослей.

По-видимому, сходные процессы идут сейчас и на о. Райкоке, с поправкой на его специфику. Перспективы восстановления экосистем вулкана Райкоке связаны с эрозией вулканических отложений, постепенным заселением птицами нового субстрата (это зафиксировано уже в сентябре 2019 г.),

заносом новых видов растений на остров. Существенный импульс сукцессии дадут фрагментарные участки уцелевшей растительности (включая частично погребенную). Первичная сукцессия пойдет по стадиям, в течение которых доминируют: мхи — пионерные травянистые растения и кустарнички — травянистые растения и кустарники — стланики. Конечная стадия — создание сомкнутого лугово-стланикового покрова.

Полный период восстановления, по нашей оценке, в условиях Райкоке должен длиться не менее ~200 лет, но в условиях периодических разрушительных извержений он постоянно прерывается на средних стадиях. Таким образом, для природы острова-вулкана характерны периодические глубокие разрушения экосистем в ходе сильных эксплозивных извержений и относительно быстрые процессы восстановления, прерываемые затем новым извержением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим за фото и видео о. Райкоке, а также за данные своих наблюдений Н.Н. Павлова, В.Ю. Баркалова, Е.В. Касперского, О.А. Румянцеву, А.М. Трухина и В.В. Черницына. Особую благодарность выражаем Е.Г. Калачевой за организацию работ на острове Райкоке в 2016 и 2020 гг. и командам судов “Афина” (2016 г.) и “Ашура” (2020 г.) за доставку на остров. Конструктивные замечания рецензентов улучшили рукопись.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы на о. Райкоке проводились в 2016 и 2020 гг. в рамках проектов РНФ № 15-17-200011 и № 20-17-00016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гирина О.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. и др. Извержение вулкана Райкоке 21 июня 2019 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 16(3). С. 303–307.
- Горшков Г.С. Хронология извержений вулканов Курильской гряды (1713–1952) // Труды Лаборатории вулканологии. 1954. Вып. 8. С. 58–99.
- Горшков Г.С. Действующие вулканы Курильской островной дуги // Труды Лаборатории вулканологии. 1958. Вып. 13. С. 5–70.
- Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.
- Гришин С.Ю. Воздействие на окружающую среду мощного извержения вулкана Пик Сарычева (Курильские острова, 2009 г.) по данным космической съемки // Исследование Земли из Космоса. 2011. № 2. С. 92–96.
- Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. (о. Райкоке, Центральные Курильские острова) // Геосистемы переходных зон. 2019. Вып. 3. № 3. С. 304–309.
- Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Некоторые новые данные о вулканах Курильских островов // Четвертичный вулканизм некоторых районов СССР. М.: Наука, 1965. С. 14–28.
- Мельников Д.В., Ушаков С.В., Гирина О.А. и др. Формирование новых озер в активной воронке Мутновского вулкана и кратере вулкана Райкоке // Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 42–44.
- Полонский А.С. Курилы // Записки Императорского Русского географического общества. По отделению этнографии. 1871. Т. 4. С. 367–576.
- Плечов П.Ю., Шишкина Т.А., Ермаков В.А. и др. Условия формирования алливалитов — оливин-анортитовых кристаллических включений — в вулканитах Курило-Камчатской дуги // Петрология. 2008. Вып. 16. № 3. С. 248–276.
- Рашидов В.А., Бондаренко В.И., Романова И.М. и др. Геофизические исследования подводных вулканов Курильской островной дуги в электронных информационных ресурсах Интернет // Материалы научно-технической конференции “Геофизический мониторинг Камчатки”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 75–82.
- Рашидов В.А., Гирина О.А., Озеров А.Ю. и др. Извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) в июне 2019 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 2. Вып. 42. С. 5–8.
- Романюк Ф.А., Дегтерев А.В. Изменение конфигурации береговой линии о. Райкоке после эксплозивного извержения 21–25 июня 2019 г. (Центральные Курильские острова) // Геосистемы переходных зон. 2020. Вып. 4. № 3. С. 351–358.
- Трухин А.М. Остров Райкоке и его обитатели // Природа. 2008. № 6. С. 33–42.
- 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.
- Bas M.L., Maitre R.L., Streckeisen A. et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram // J. Petrology. 1986. V. 27. № 3. P. 745–750.
- Burkanov V., Gurarie E., Altukhov A. et al. Environmental and biological factors influencing maternal attendance patterns of Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) in Russia // J. Mammalogy. 2011. V. 92(2). P. 352–366.
- Burkanov V., Pavlov N., Gelatt T. Catastrophic Destruction of Raykoke Island Steller Sea Lion Rookery by Volcanic Eruption: June, 2019 // Abstracts of Alaska Marine Science Symposium. Anchorage, Alaska, 2020. P. 216.
- Burkanov V., Russel A., Gelatt T. One year later: Modest recovery of the Raykoke Island Steller sea lion rookery after the June 2019 volcanic eruption // Alaska Marine Science Symposium. 2021. P. 144.
- Hoblitt R.P., Harmon R.S. Bimodal density distribution of cryptodome dacite from the 1980 eruption of Mount St.

- Helens, Washington // *Bulletin of Volcanology*. 1993. V. 55(6). P. 421–437.
- Houghton B.F., Wilson C.J.N. A vesicularity index for pyroclastic deposits // *Bull. Volcanol.* 1989. V. 51(6). P. 451–462.
- Inman D.L. Measures for describing the size distribution of sediments // *J. Sediment. Res.* 1952. V. 22(3). P. 125–145.
- Newhall C.G., Self S. The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 231–238.
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P. *Volcanoes of the World / Third Edition*. California: University of California Press, 2011. 568 p.
- Tanakadate H. Volcanic activity in Japan and vicinity during the period between 1924 and 1931 // *Japanese J. Astronomy and Geophysics*. 1931. V. 9. 47 p.
- Takahashi H., Barkalov V.Y., Gage S. et al. A floristic study of the vascular plants of Raikoke, Kuril Islands // *Acta Phytotax. Geobotanica*. 2002. V. 53(1). P. 17–33.
- Walker G.P. Grain-size characteristics of pyroclastic deposits // *J. Geology*. 1971. V. 79(6). P. 696–714.

The 2019 Explosive Eruption of Raikoke Volcano (Kurile Islands): Pyroclastic Deposits and Their Impact on the Relief and Ecosystems

S. Yu. Grishin^{1, *}, A. B. Belousov^{2, **}, M. G. Belousova², A. Auer^{3, ***}, and I. A. Kozyrev²

¹*Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (FNTs Biodiversity FEB RAS), prosp. 100-letiya Vladivostoka, 159, Vladivostok, 690022 Russia*

²*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bulv. Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

³*Shimane University, Matsue, Japan, Yamashiro-cho 698-1, Matsue city, Shimane Prefecture, 690-0031 Japan*

*e-mail: grishin@biosoil.ru

**e-mail: belousov@mail.ru

***e-mail: auer@riko.shimane-u.ac.jp

The short-term violent explosive eruption occurred on June 21, 2019 at the small volcanic island Raikoke located in the central part of Kurile Island arc. The climactic stage of the eruption lasted 3.5 h, producing the ash cloud up to 13 km high. We have analyzed a set of satellite images of the volcano as well as conducted a field work in order to investigate pyroclastic deposits of the eruption and to determine its impact on ecosystems of the island. We have found that the eruption had phreatomagmatic Subplinian – Plinian character. The rising magma batch of basaltic andesite composition interacted with groundwater that was probably represented mainly by seawater that precipitated into the volcanic edifice through permeable rocks of the volcanic island. Tephra and numerous pyroclastic flows of the eruption emplaced the hot deposits that covered the whole area of the island, killed vegetation and destroyed rookeries and colonies of marine animals. The largest volume of the pyroclastic material was deposited mostly as pyroclastic flow fans at the foot of the volcanic cone, so the coastline moved in the sea and the area of the island increased up to 15%. During the first year after the eruption, the friable pyroclastic deposits were intensively eroded and redeposited, forming new beaches on the island coast. The recovery of the Raikoke ecosystems will be associated with the continuing erosion of the pyroclastic substrate accompanied by gradual recolonization of the island by birds and by natural introduction of new plant species. Patches of the survived vegetation will accelerate the plant succession. In general, the ecosystems of the island experience strong periodic destructions by strong explosive eruptions followed by relatively fast periods of recovery, which are interrupted then by a new eruption.

Keywords: Kurile Islands, Raikoke volcano, phreatomagmatic eruption, pyroclastic flow deposit, ecosystem