

Научные статьи

УДК 551.21; 551.46

DOI: 10.31431/1816-5524-2021-2-50-6-21

*Памяти исследователя Тихого океана
Н.И. Селиверстова посвящается*

МОРФОЛОГИЯ ПОДВОДНОГО ВУЛКАНА ПИЙПА В КОМАНДОРСКОЙ КОТЛОВИНЕ ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ МНОГОЛУЧЕВЫМ ЭХОЛОТОМ

© 2021 Б.В. Баранов¹, Р. Вернер², В.А. Рашидов³, Н.В. Цуканов¹, К.А. Дозорова¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, 117997; e-mail: bbaranov@ocean.ru

²ГЕОМАР, Центр исследований океана объединения Гельмгольца, Киль, Германия, 24148; rwerner@geomar.de

³Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006

Проведен анализ батиметрических данных, полученных в рейсах на германском научно-исследовательском судне «Зонне» с помощью многолучевых эхолотов в рамках российско-германских проектов КАЛЬМАР (рейс SO201-2, 2009 г.) и БЕРИНГ (рейс SO249-2, 2016 г.) в Командорской котловине Берингова моря. Построены детальные батиметрические карты подводного вулкана Пийпа. Описаны новые морфологические особенности его вершинных построек, их возрастные взаимоотношения, локализованы приуроченные к постройкам проявления гидротермальной активности, закартированы все побочные конусы и лавовые потоки. По распределению побочных конусов и трещинных излияний было определено тектоническое палеонапряжения, существовавшее на время их образования, предположительно, после позднего миоцена – раннего плиоцена. Оно отличается от современного тектонического напряжения, обусловленного правосторонними смещениями вдоль зоны разломов Беринга.

Ключевые слова: Берингово море, Командорская котловина, вулкан Пийпа, батиметрические исследования.

ВВЕДЕНИЕ

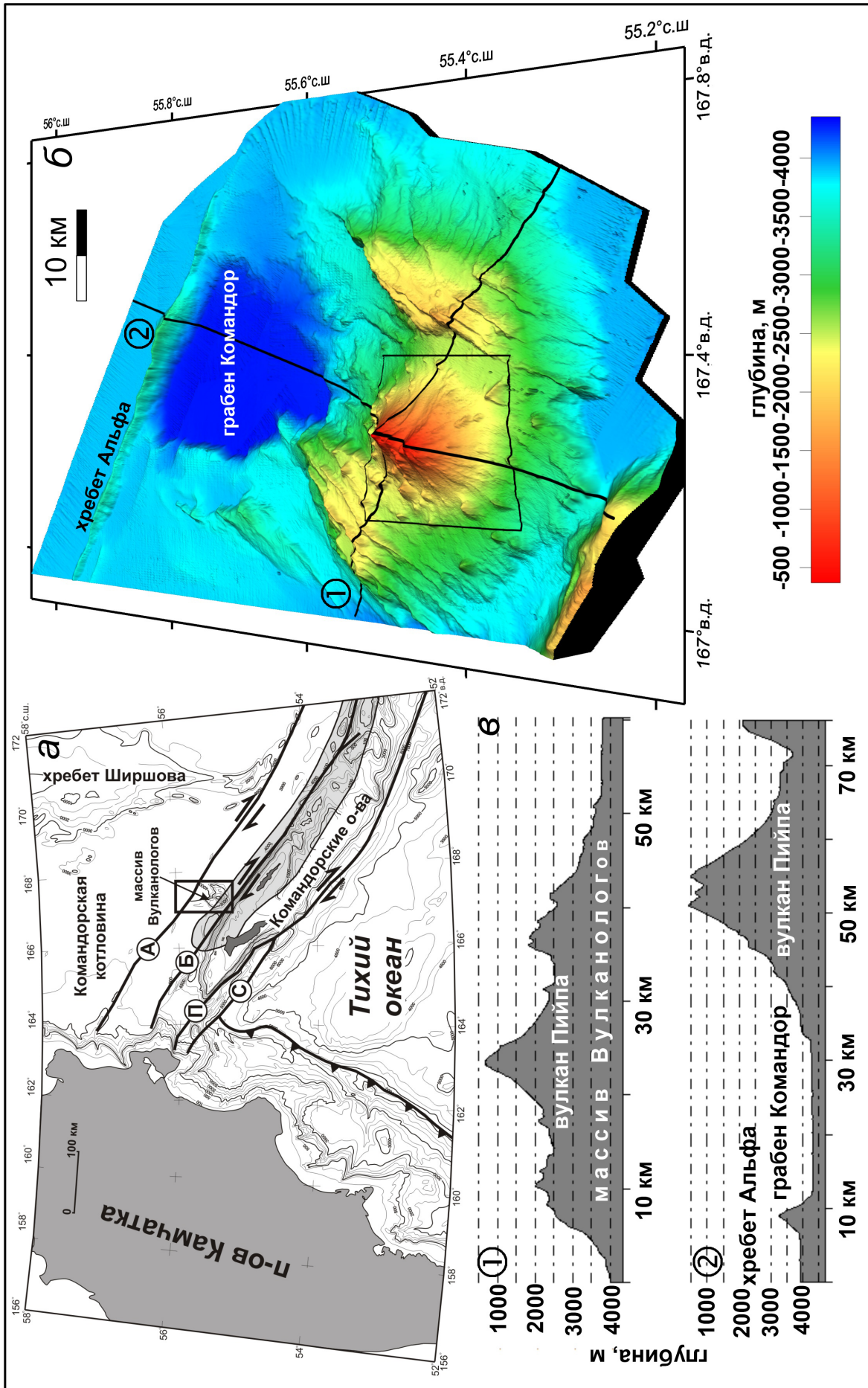
Командорская котловина расположена в западной части Берингова моря и ограничена с юга Командорским сегментом Алеутской островной дуги и с востока — хребтом Ширшова (рис. 1). Дно котловины выровнено и полого наклонено в юго-восточном направлении с увеличением глубины от 3500 до 3900 м. В пределах котловины выделяется несколько положительных форм рельефа, самой крупной из которых является вулканический массив, примыкающий к подножью Командорских островов.

Этот массив был обнаружен в 1984 г. в рейсе научно-исследовательского судна (НИС) «Вулканолог» и получил название массива Вулка-

нологов. В центральной части массива была выделена вулканическая постройка — вулкан Пийпа (Селиверстов и др., 1986; 1988). С этого времени и до начала 1990-х гг. массив Вулканологов и вулкан Пийпа исследовались различными геолого-геофизическими методами и плавсредствами (Селиверстов, 1998, 2009, 2013), включая погружения глубоководных обитаемых аппаратов (ГОА) «Мир» (Сагалевич и др., 1992).

В результате драгирования с борта НИС «Вулканолог» и опробования с ГОА «Мир» на массиве Вулканологов и вулкане Пийпа был получен большой объем коренных пород и при их изучении выделено три комплекса вулканических пород, которые соответствуют различным стадиям формирования массива и вулкана. Состав

МОРФОЛОГИЯ ПОДВОДНОГО ВУЛКАНА ПИЙПА



вулканических пород этих комплексов дает основание предположить их эволюцию от задугового рифтинга, при котором изливались базальтовые толеитовые лавы основания массива Вулканологов до формирования островодужного вулкана Пийпа с вязкими дацитовыми лавами (Волюнец и др., 1992; Portnyagin et al., 2017; Yagodzinski, Kelemen, 1998; Yagodzinski et al., 1994).

Наличие над вулканом Пийпа гидроакустической аномалии (газового факела) и пропитка гидротермальным нонтронитом дацитовых пемз (Богданова и др., 1989; Селиверстов и др., 1988) послужило основанием для поиска на вершине вулкана гидротермальных проявлений с помощью ГОА «Мир» (Сагалевич и др., 1992). В результате были обнаружены гидротермальные ангидридовые постройки (трубы) высотой до 1.5 и диаметром до 0.4 м, из верхних частей которых наблюдалось активное выделение флюида (Сагалевич и др., 1992; Селиверстов и др., 1995). В газовой компоненте флюида преобладали углеводороды, среди них — метан ~80%, и азот ~17%. (Полоник, 2018; Сагалевич и др., 1992; Селиверстов и др., 1995; Торохов и др., 1991; Taran et al., 1992; Torokhov et al. 1994). На вулкане были также выявлены карбонатные гидротермальные постройки, сложенные арагонитом и кальцитом (Сагалевич и др., 1992).

В XXI в. изучение этой структуры выполнялось в пяти научных рейсах, первый из которых был проведен на НИС «Профессор Хромов» в рамках российско-американской программы по исследованию Арктики «Русалка» (2004 г.). В этом рейсе на вершинной части вулкана Пийпа была выполнена съемка гидролокатором бокового обзора, проведено драгирование коренных пород и опробование донных осадков (Glasby et al., 2006).

Второй рейс проходил в 2009 г. на НИС «Зонне» (SO201-2) по программе российско-германского проекта KALMAR (Kurile-Kamchatka and Aleutian Marginal Sea — Island Arc System).

В рейсе многолучевым эхолотом была выполнена батиметрическая съемка массива Вулканологов и проведено его опробование (FS Sonne Fahrtbericht., 2009).

Третий рейс SO249-2 в 2016 г. на НИС «Зонне» выполнялся в рамках российско-германского проекта БЕРИНГ. В рейсе с помощью многолучевого эхолота была детально закартирована вершинная часть вулкана Пийпа и отработано несколько станций драгирования (RV Sonne Fahrtbericht., 2016).

В 2016 и 2018 гг. вершина вулкана Пийпа изучалась и опробовалась в 75-м и 82-м рейсах НИС «Академик М.А. Лаврентьев» с помощью телеуправляемого подводного аппарата «Команч» (Галкин, Ивин, 2019; Галкин и др., 2019).

В результате проведенной батиметрической съемки в рейсах НИС «Зонне» были подготовлены батиметрические карты массива Вулканологов и вулкана Пийпа (FS Sonne Fahrtbericht., 2009; RV Sonne Fahrtbericht., 2016). Эти карты являлись иллюстративным материалом при создании нового вероятностного варианта геолого-геоморфологического строения и истории формирования этой структуры (Мелекесцев, 2014), и для показа положения точек драгирования (Portnyagin et al., 2017).

В настоящей работе с использованием полученных цифровых данных была подготовлена новая карта вулкана Пийпа и серия детальных батиметрических карт на отдельные участки этой вулканической постройки. Подготовленные карты послужили основой для рассмотрения и анализа морфологии данной структуры. В результате были получены более объективные представления о рельефе вулкана в целом, выделены на его склонах новые вулканические формы, такие как побочные конусы и лавовые потоки, подтверждено различие в морфологии и возрастных взаимоотношений вершинных построек, показана приуроченность

Рис. 1. Батиметрическая карта зоны сочленения п-ва Камчатка и Алеутской островной дуги с обозначением основных форм рельефа и крупных разломных зон (Селиверстов, 1998; Baranov et al., 1991; Gaedicke et al., 2000) (а). Изобаты проведены через 500 м. Линией с треугольниками показана зона субдукции, линиями со стрелками — зоны правосторонних сдвигов: Беринга (Б), Пикежского (П), Стеллера (С) и Альфа (А). Полосой серого цвета вдоль разлома Беринга обозначена очаговая зона Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. по (Чебров и др., 2017); 3D модель рельефа массива Вулканологов, составленная по данным батиметрической съемки в рейсах SO201-2 и SO249-2 (б). Прямоугольник обозначает положение карты, представленной на рис. 2а. Положение модели показано на рис. 1а прямоугольником; батиметрические профили, иллюстрирующие морфологию массива Вулканологов и вулкана Пийпа (в). Положение профилей см. на рис. 1б.

Fig. 1. Bathymetric map of the Kamchatka-Aleutian junction area, showing the main landforms and large fault zones (Seliverstov, 1998; Baranov et al., 1991; Gaedicke et al., 2000) (a). Isobaths are drawn at 500 m intervals. The line with triangles shows the subduction zone, the lines with arrows show the right-lateral strike-slip fault zones: Bering (B), Pikezh (P), Steller (S) and Alpha (A). The gray band along the Bering fault indicates the rupture zone of the Near-Aleutian earthquake of 17.07.2017 according to (Chebrov et al., 2017); 3D elevation model of the Vulcanologov Massif, compiled from data of the bathymetric survey in SO201-2 and SO249-2 (b). The rectangle indicates the position of the map shown in Fig. 2a. The position of the model is shown as a rectangle in Fig. 1a; the bathymetric profiles illustrating the morphology of the Vulcanologov Massif and Piip volcano (v). See Fig. 1b for the position of the profiles.

гидротермальной активности вулкана к определенным структурным элементам вершинных построек и дополнены имеющиеся представления о характере палеотектонических напряжений в этом районе.

РЕЛЬЕФ ЮЖНОЙ ЧАСТИ КОМАНДОРСКОЙ КОТЛОВИНЫ

В рельефе южной части Командорской котловины выделяется несколько морфоструктур: массив Вулканологов, вулкан Пийпа, грабен Командор и хребет Альфа (рис. 1). Массив Вулканологов примыкает к основанию континентального склона Командорских островов, отделяясь от него разломом Беринга, который протягивается на северо-запад до п-ва Камчатский (Камчатский Мыс). Разлом Беринга вместе с разломами Пикежским и Стеллера, расположенными во фронтальной части блока Командорских островов, формируют Командорскую зону сдвига (Селиверстов, 2009; Varanov et al., 1991).

Массив Вулканологов является крупной вулканической структурой с поперечными размерами 50×30 км и высотой более 3.5 км. Основание массива находится на глубинах 3700–3800 м, в его северо-восточной части оно опускается до 4200 м; минимальные отметки над вершиной определенные в различных рейсах НИС равны 355–368 м. Массив характеризуется сложным строением и состоит из трех частей: северо-западной, юго-восточной и центральной (рис. 1б, 1в). Северо-западная и юго-восточная части массива представляют собой систему линейных хребтов, ориентированные в северо-восточном направлении, центральную часть массива занимает вулкан Пийпа.

К массиву Вулканологов с севера примыкает грабен Командор, дно которого опущено на 400–500 м относительно прилежащих участков котловины и находится на глубине 4200–4300 м (рис. 1в). С севера грабен Командор ограничен хребтом Альфа, который поднимается над ровным дном Командорской котловины на высоту около 650 м, его превышение над дном грабена Командор составляет ~1000 м. Хребет Альфа простирается в северо-западном — юго-восточном направлении, прослеживается в виде хребта или поднятия фундамента, перекрытого осадками, от хребта Ширшова до континентального склона п-ова Камчатка и в структурном плане соответствует одному из разломов Командорской котловины (Селиверстов, 2009; Varanov et al., 1991).

Массив Вулканологов, грабен Командор, примыкающая к нему часть хребта Альфа и участок дна Командорской котловины к юго-востоку

от массива Вулканологов были закартированы в рейсах НИС «Зонне» SO201-2 и SO249-2 с использованием двух типов многолучевых эхолотов.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Батиметрическая съемка во время рейса SO201-2 проводилась с использованием многолучевого эхолота SIMRAD EM120 (FS Sonne Fahrtbericht., 2009). В рейсе SO219-2 использовалась система, состоящая из двух типов многолучевых эхолотов SIMRAD EM122 и SIMRAD EM710 (изготовитель фирма Kongsberg Maritime) (RV Sonne Fahrtbericht., 2016). Многолучевой эхолот SIMRAD EM122 работает на частоте 12 kHz, использует 288 лучей, угол сектора покрытия достигает 150° относительно оси судна (75° по правому и левому бортам). Интервал глубины измерения составляет 20–11000 м, ширина измеряемой полосы приблизительно равна 6-кратной глубине.

Высокочастотный многолучевой эхолот SIMRAD EM710 работает на частоте 70–100 kHz, использует 256 лучей, угол сектора покрытия составлял 140° относительно оси судна (70° по правому и левому бортам). Максимальная глубина регистрации равна 2000 м, ширина полосы съемки в 5.5 раз превышает глубину.

Использование при картировании в рейсе SO249-2 вулкана Пийпа эхолотов SIMRAD EM 710 и EM 122 в соответствии со стандартами Международной Гидрографической Организации (International Hydrographic Organization, ИГО) отвечало требованиям батиметрической съемки для всех интервалов глубин. Точность измерения зависела от погодных условий и используемого скоростного разреза водной толщи. Во время рейса при эхолотной съемке скоростные разрезы были получены в районах исследований при зондировании водной толщи с использованием гидрологического зонда STD. Точность измерения также зависела от глубины и угла сектора покрытия и для глубин 2000–3000 м составляла около 10 м.

Сбор данных, их обработка, визуализация и копирование на внутренние или внешние диски производились с помощью программы Seafloor Information System (SIS) в операционной системе Windows XP или Windows 7. Для обработки полученных данных использовалась программа QPS Qimera V. 1.3. После загрузки первичных данных с эхолотов проводилась коррекция глубины по скоростному разрезу водной толщи и автоматическое удаление ошибочных измерений глубины. Вся обработка осуществлялась системными операторами НИС «Зонне» в течение рейсов.

В результате обработки генерировался файл формата *a.sd*, который использовался для трехмерной визуализации рельефа с помощью программы QPS Fledermaus. Данные также экспортировались в файлы формата ASCII (*x, y, z*) с целью построения карт с использованием программ GMT или Surfer. В настоящей работе при расчете значений на регулярной сетке (гридов) и рисовки карт использовалась программа Surfer 13, построение профилей проводилось с помощью программы Global Mapper 18, программа Grapher 11 использовалась для построения роз-диаграмм и статистической обработки данных.

ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЛЬЕФА ВУЛКАНА ПИЙПА

Вулкан Пийпа располагается в центральной части массива Вулканологов между линейными поднятиями, ориентированными в северо-восточном направлении и ограничивающими вулкан с запада и востока (рис. 1*б*, 1*в*). В качестве изолированной структуры с запада и востока

вулкан оконтуривается изобатой 2500 м, а его северо-восточный и юго-западные склоны различимы в рельефе до глубины 3000 м. Длинная ось основания вулкана слегка вытянута по азимуту 332° СЗ; на глубинах менее 2000 м, она постепенно меняет свое простирание до 12°, что подчеркивается тремя сросшимися вулканическими постройками вершинной части (рис. 1*б*, 1*в*, 2*а*, 2*б*).

Эти вулканические постройки, названные в соответствии с их расположением Северной, Центральной и Южной (Селиверстов, 1998, 2009; Селиверстов и др., 1995), выделяются в виде обособленных форм рельефа, начиная с глубины в несколько сотен метров. Минимальные отметки, зафиксированные на вулкане равны 355–368 м, и следовательно высота вулкана превышает 2 км. Крутизна склонов вулкана достигает 15°, площадь составляет 230 км², объем равен 161 км³.

Данные, полученные при картировании вулкана с помощью многолучевых эхолотов в рейсах НИС «Зонне», позволили подробно рассмотреть морфологию вершинных построек и склонов

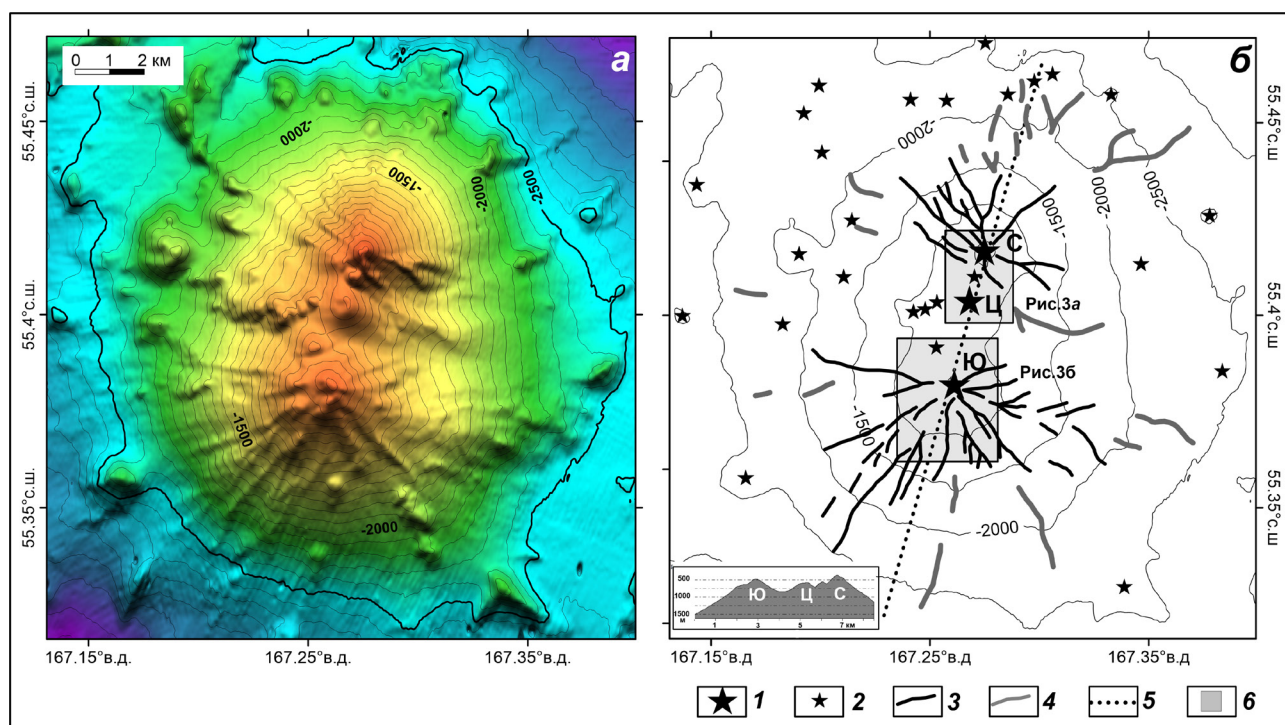


Рис. 2. Батиметрическая карта вулкана Пийпа (*а*) и ее интерпретация (*б*). Изобаты проведены через 100 м и 500 м, соответственно. Изобата 2500 м выбрана в качестве основания вулкана: 1 — вершинные вулканические постройки (С — Северная, Ц — Центральная, Ю — Южная); 2 — побочные конусы; 3 — лавовые потоки, начинающиеся на вершинных постройках; 4 — трещинные лавовые потоки; 5 — положение профиля, показанного на врезке; 6 — положение 3D моделей рельефа. Карта составлена по данным съемки многолучевым эхолотом в рейсах SO201-2 и SO249-2.

Fig. 2. Bathymetric map of Piip Volcano (*a*) and its interpretation (*b*). Isobaths are drawn at 100 m and 500 m, respectively. The 2500 m isobath is selected as the base of the volcano: 1 — the summit volcanic edifices (N — Northern, C — Central, S — Southern); 2 — side cones; 3 — lava flows starting from the summit edifices; 4 — fissure lava flows; 5 — position of the profile shown in the inset; 6 — position of 3D elevation models. The map is compiled from the data of SO201-2 and SO249-2 multibeam echosounder surveys.

подводного вулкана Пийпа, а также выделить ряд неизвестных ранее вулканических форм рельефа (рис. 2а, 2б).

Вершинные вулканические постройки. Северная, Центральная и Южная вершинные постройки вулкана Пийпа располагаются на прямой линии, ориентированной по азимуту 12°, расстояние между Северной и Южной постройками составляет около 4 км. Северная постройка отделяется от Центральной по изобате 680 м,

а ее размеры составляют 1500×1100 м. Вершина постройки сложена дацитами, которые формируют два купола (рис. 3а, в), названные Восточным и Западным (Селиверстов, 1998, 2009). На вершине Восточного купола находится небольшой кратер диаметром около 200–250 м (рис. 3а, врезка), который мог возникнуть в результате обрушения дацитового экструзивного купола. Минимальная глубина на вершине стенки кратера равна 375 м, глубина кратера составляет 25 м.

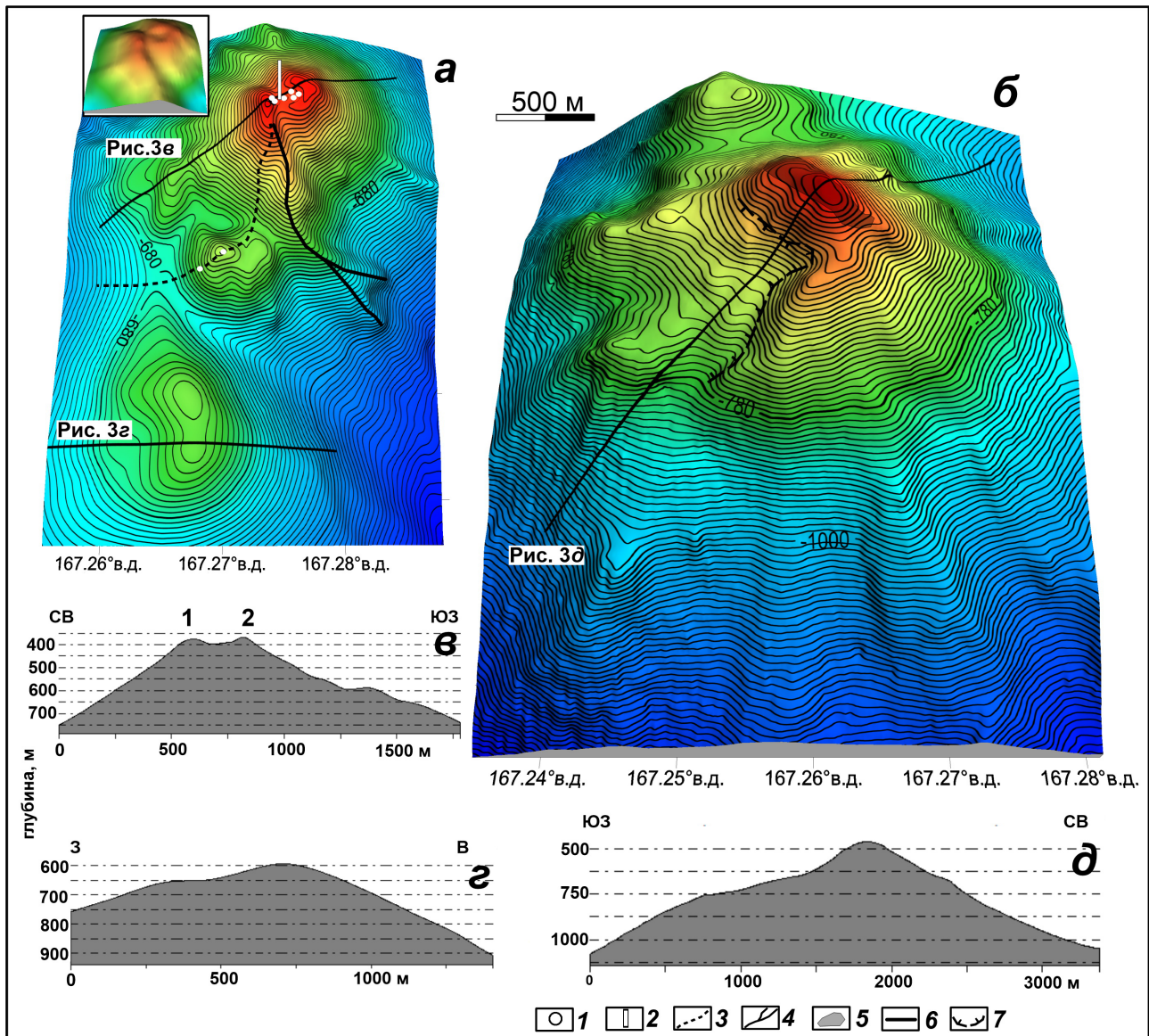


Рис. 3. 3D модели Северной, Центральной (а) и Южной (б) построек. Изобаты проведены через 10 м. На врезке показана 3D модель вершины Северной постройки: 1 — точки проявления гидротермальной активности; 2 — газовый факел; положение лавового потока; 3 — по Селиверстову (2009), 4 — по данной съемке; 5 — гидротермальное поле Южной постройки; 6 — профили; 7 — основание стенки кратера Южной постройки; (в-д) батиметрические профили, пересекающие вершины Северной, Центральной и Южной построек. 1, 2 — Восточный и Западный купола Северной постройки.

Fig. 3. 3D models of the Northern, Central (a) and Southern (б) summit edifices. Contour lines are 10 m. The inset shows a 3D model of the top of the Northern edifice: 1 — location of hydrothermal activity in the Northern summit; 2 — gas flare, position of the lava flow; 3 — according to (Seliverstov, 2009), 4 — according to this survey; 5 — hydrothermal field of the Southern edifice, 6 — profiles, 7 — base of the crater wall of the Southern edifice; (в-д) bathymetric profiles crossing the tops of the Northern, Central and Southern edifices.

Западный купол расположен на расстоянии около 500 м от Восточного купола по азимуту 240°, минимальная глубина над его вершиной равна 368 м. Западный купол не вписывается в очертания кратера и, по нашему мнению, не является его западной стенкой, а представляет собой более позднюю дацитовую экструзию, как это предполагалось ранее (Селиверстов, 1998, 2009). Экструзия вытянута в субмеридиональном направлении (азимут 353°), и вероятно маркирует подводящий разлом аналогичного простирания.

От Восточного и Западного куполов начинаются несколько лавовых потоков, которые, за исключением одного из них, продолжаются за рамки карты (рис. 3а). Согласно Н.И. Селиверстову (1998), этот поток отходит от Западного купола на юг и потом поворачивает на запад, заполняя ложбину между Северной и Центральной постройками.

Проведенная батиметрическая съемка, однако, показала, что он поворачивает на восток, заканчиваясь уступом на глубине 860 м; во время предыдущих исследований (Селиверстов, 1998) за лавовый поток был принят побочный конус, расположенный на южном склоне Северной постройки (рис. 3а). Высота побочного конуса составляет 45 м, он удален от вершины постройки на расстоянии 750 м по азимуту 192°, а минимальная глубина на его вершине равна 545 м.

Детальные данные по рельефу Северной постройки дали возможность привязать выявленные здесь гидротермальные проявления (Сагалевич и др., 1992; Селиверстов, 1998, 2009) к определенным формам рельефа. Два поля бактериальных матов и излияния теплых вод были зарегистрированы на западном склоне и вершине побочного конуса. На вершине Северной постройки гидротермальные ангидритовые отложения, бактериальные маты и выходы теплых вод располагаются внутри кратера (рис. 3а). На записях эхолота в кратере регистрируется газовый факел, который впервые был обнаружен в 1986 г. (Селиверстов и др., 1988), а в последний раз наблюдался в 2004 г. (Glasby et al., 2006).

Центральная постройка вулкана Пийпа ограничивается изобатой 680 м; минимальная глубина ее вершины равна 580 м (рис. 3а). Вершина постройки вытянута в субмеридиональном направлении по азимуту 345°, слегка изогнута и на субширотных разрезах не является симметричной поскольку на ее западном склоне на глубине 650 м существует пологая ступень (рис. 3з). Центральная постройка отстоит от Северной постройки на расстоянии в 1.5 км и в плане имеет форму капли, острие которой направлено на север. Постройка асимметрична, поскольку ее восточный и южный склоны являются более крутыми по сравнению с западным склоном.

Южная постройка расположена на расстоянии 2.5 км от Центральной постройки и оконтурена изобатой 780 м. Основание постройки имеет волнистые очертания, что обусловлено наличием лавовых потоков (рис. 3б). Она слегка вытянута по азимуту 335°, что подчеркивается наличием на ее северном склоне побочного конуса высотой около 50 м. В этом же направлении вытянута вершина постройки, минимальная глубина которой равна 464 м. Вершина Южной постройки в плане имеет очертания полумесяца, северная часть которого оконтурена изобатой 470 м, а южная располагается на глубине 530 м. На основании формы вершины постройки можно предположить, что она является восточной стенкой, существовавшего здесь кратера диаметром около 500 м. От стенки в западном направлении отходят два выступа, имеющие в плане форму треугольников, которые полого погружаются от 660 до 760 м и от 630 до 690 м и, по всей видимости, сложены продуктами разрушения западной стенки кратера. В результате на западном склоне Южной постройки наблюдается пологая ступень, аналогично ступени на западном склоне Центральной постройки (рис. 3г, 3д).

При исследованиях с ГОА «Мир» (Сагалевич и др., 1992; Селиверстов, 1998) на вершине Южной постройки было обнаружено крупное гидротермальное поле. Размеры этого поля точно не установлены. Сопоставление маршрута ГОА «Мир», исследовавшего поле (Сагалевич и др., 1992) с полученной батиметрической картой дает основание сделать вывод, что оно приурочено к вершине восточной стенки кратера (рис. 3б).

Составленные по данным многолучевых эхолотов карты, дают основание выделить на вершине Северной постройки кратер (рис. 3а, врезка) и предполагать наличие кратера на Южной постройке. Западная стенка кратера Южной постройки, вероятно, была разрушена с образованием двух пологих языков обломочного материала, который, по всей видимости, перекрыл более ранние лавовые потоки.

Побочные конусы. При батиметрических исследованиях с помощью многолучевых эхолотов точность измерения глубины составляла 10 м, поэтому при выделении побочных конусов принимались во внимание только те конусы, которые возвышались над склоном на высоту более 10 м. По этому критерию на склонах вулкана Пийпа было выделено 26 побочных конусов, распределенных неравномерно как по площади, так и по глубине (рис. 4а, 4б).

Основная часть побочных конусов (21 конус) расположена в северо-западном секторе вулкана (4а) на склонах остальной части вулкана были выделены только пять конусов. Большинство

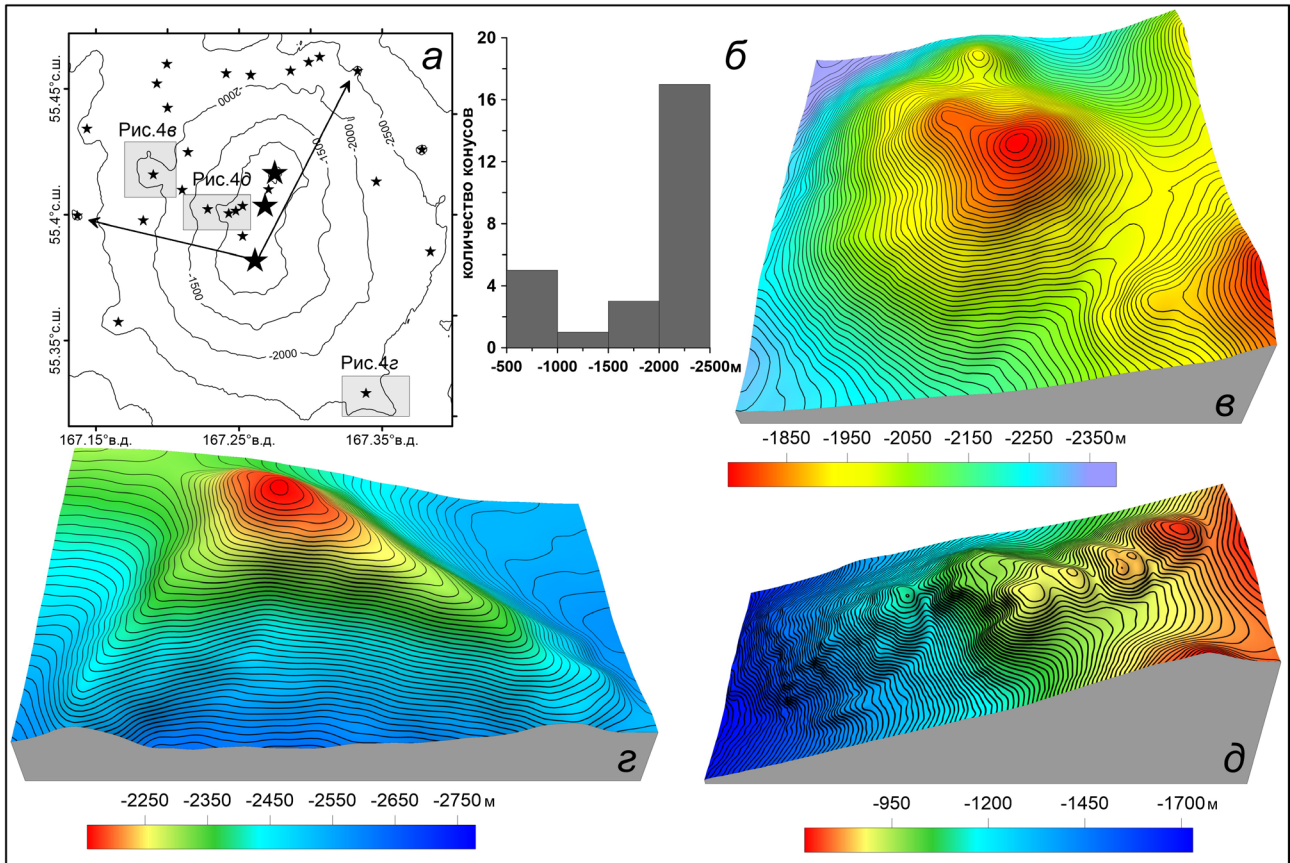


Рис. 4. Вершинные постройки (залитые большие звезды) и побочные конусы (залитые маленькие звезды) вулкана Пийпа (а). Серые прямоугольники обозначают положение 3D моделей. В секторе, заключенном между линиями со стрелками располагается большинство конусов. Распределение побочных конусов по интервалам глубин в 500 м (б). Типы побочных конусов: изометричный (в), вытянутый (г) и цепочка конусов (д). Изобаты проведены через 10 м.

Fig. 4. The summit edifices (filled large stars) and side cones (filled small stars) of the Piip volcano (a). Grey boxes denote the position of 3D models. The sector between lines with arrows contains most of the cones. Distribution of side cones by depth interval of 500 m (b). Side cone types: isometric (c), elongated (d) and the chain of cones (e). Isobaths are drawn at 10 m intervals.

побочных конусов (17 конусов) обнаружено глубже 2000 м (рис. 4б). В интервале глубин 500–1000 м находятся пять конусов, два из которых располагаются вблизи вершин Северной и Южной вулканических построек и три конуса образуют цепочку длиной около 2 км, которая отходит в западном направлении от Центральной постройки. Между изобатами 1000 и 1500 м находится один, а в интервале глубин 1500–2000 м расположены три конуса.

Наиболее крупные конусы находятся на северо-западном склоне вулкана Пийпа, где их высота достигает 220 м, а диаметр равен 1.5 км. Конусы имеют изометричные (рис. 4в) или удлиненные формы, что может быть связано с наличием питающих трещин определенной ориентировки или с растеканием лавы вниз по склону (рис. 4г). Побочные конусы, как правило, являются изолированными и только три из них образуют цепочку длиной около 2 км, которая отходит в западном направлении от Центральной постройки (рис. 4а, 4д).

Лавовые потоки. Наличие лавовых потоков на склонах Северной вершины вулкана Пийпа отмечалось ранее (Селиверстов, 1998, 2009). На карте, полученной при съемке вулкана многолучевыми эхолотами, они были обнаружены повсеместно на его склонах (рис. 5а). В рельефе лавовые потоки выделяются как линейные гряды (рис. 5б, 5в), отчетливо видимые вблизи вершин и постепенно исчезающие вниз по склону. Потоки имеют остроугольную или плоскую поверхность, их высота достигает 50 м. То, что эти гряды являются лавовыми потоками, подтверждается наблюдениями, выполненными с ГОА «Мир» (Сагалевич и др., 1992; Селиверстов, 1998).

Лавовые потоки можно разделить на два типа. К первому относятся потоки, излившиеся из Северной и Южной вулканических построек (на склонах Центральной постройки лавовые потоки отсутствуют). Второй тип соответствует трещинным излияниям лавы на склонах вулкана Пийпа (рис. 5г, 5д). Лавовые потоки Северной

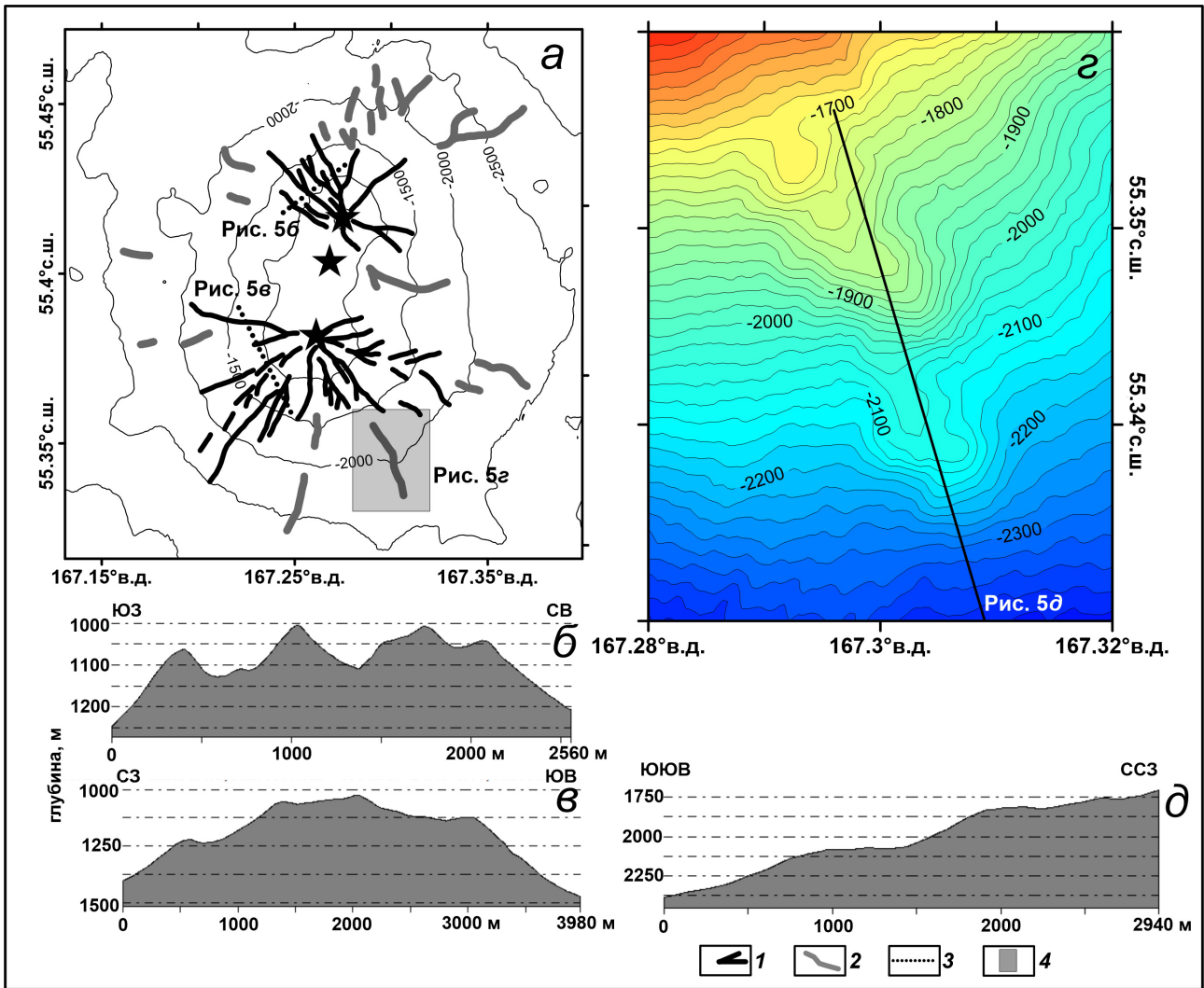


Рис. 5. Лавовые потоки на склонах вулкана Пийпа (а): 1 — потоки, начинающиеся от вершин вулкана; 2 — трещинные потоки; 3 — батиметрические профили, представленные на рис. 5б, 5в; 4 — местоположение батиметрической карты, показанной на рис. 5г. Профили, пересекающие лавовые потоки Северной (б) и Южной (в) построек. Батиметрическая карта трещинного потока (г) и его профиль (д), обозначенный на карте прямой линией.

Fig. 5. Lava flows on the slopes of Piip volcano (a): 1 — flows starting from the summit edifices, 2 — fissure lava flows, 3 — bathymetric profiles shown in Fig. 5б, 5в, 4 — location of the bathymetric map shown in Fig. 5г. Bathymetric profiles crossing the lava flows of the Northern (б) and Southern (в) summit edifices. The bathymetric map of the fissure flow (г) and its profile (д) marked in the map by a straight line.

постройки захватывают северный сектор склона вулкана, а лавовые потоки Южной постройки — его южный сектор. Максимальная длина потока, который различим в рельефе, для Северной постройки составляет 2.8 км, для Южной постройки она равна 5 км. Лавовые потоки Северной постройки в рельефе проявляются более отчетливо по сравнению с лавовыми потоками Южной постройки, поскольку имеют большую мощность и более резкие ограничения по бокам и на своих окончаниях.

Трещинные лавовые потоки представляют собой небольшие гряды на склонах вулкана, которые также как и лавовые потоки, приуроченные к Южной и Северной вулканическим

постройкам, располагаются в их северном и южном секторах (рис. 5а). Трещинные потоки являются, в основном, короткими — не более 1 км, длина только одного из них достигает 3 км. Начало трещинных потоков, в основном, находится ниже изобаты 1500 м.

Разрывные нарушения. По сравнению с грабеном Командор, который ограничивается сбросами, выраженными серией уступов общей высотой до 500 м, видимые в рельефе разрывные нарушения в пределах вулкана Пийпа практически отсутствуют, поскольку вулканизм превалирует здесь над тектоническими процессами. Единичным примером тектонической активности в рельефа юго-западного склона

вулкана Пийпа служит крупный побочный конус диаметром 2 км и высотой 170 м (рис. 6а, 6б). Западный борт этого конуса состоит из ряда ступенек и разделяющих их уступов высотой до 90 м, которые простираются по азимуту 15–20° и могут быть прослежены на расстояние более 3 км (рис. 6б, 6в). Принимая во внимание генеральную тектоническую обстановку растяжения, существующую в этом районе, можно предполагать, что уступы являются плоскостями сбросов.

Северная, Центральная и Южная вулканические постройки, отчетливо выстроены вдоль линии с азимутом 12°, и это дает основание полагать, что их питающие каналы связаны с разломом аналогичного простирания. (рис. 6а). Вытянутость Западного купола на Северной постройке по азимуту 353° может свидетельствовать

о наличии разлома. Единственная цепочка конусов на борту Центральной постройки с азимутом простирания 50°, вероятно, также контролируется разломом.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате предыдущих батиметрических исследований был установлен ряд особенностей морфологии вулкана Пийпа, обобщенных в работах (Селиверстов, 1998, 2009) и заключающихся в следующем:

– вулкан состоит из трех сросшихся вулканических построек, расположенный на линии, ориентированной по азимуту 12° и названных в соответствии с их расположением Северной, Центральной и Южной постройками;

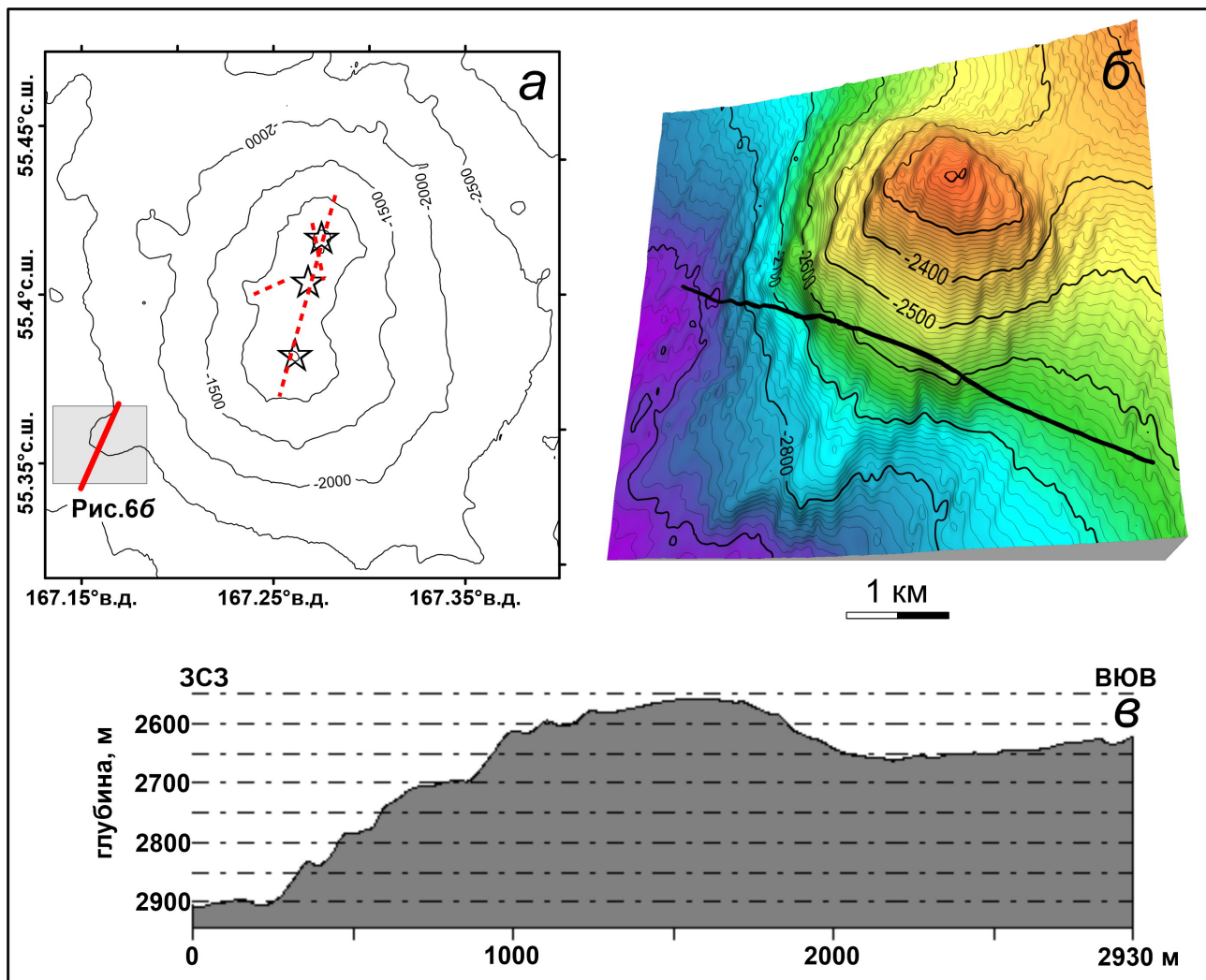


Рис. 6. Установленные (красная линия) и предполагаемые (пунктирные красные линии) разрывные нарушения на вулкане Пийпа (а). Залитый серый прямоугольник обозначает положение 3D модели, представленной на рис. 6б; 3D модель побочного конуса (б). Сечение изобат 10 м. Линией обозначен профиль, показанный на рис. 6в.

Fig. 6. Established (red line) and inferred (dashed red lines) faults on Piip volcano (a). The shaded gray rectangle indicates the position of the 3D model presented in Fig. 6б; 3D model of the side cone (б). Isobaths are drawn at 10 m intervals. The line indicates the profile shown in Fig. 6в.

– Северная постройка состоит из двух куполов дацитового состава, для Южной постройки, сложенной дацитовыми пемзами предполагалось наличие кальдеры;

– на склонах вулкана Пийпа выделено 8 побочных конусов и отмечалось наличие лавовых потоков.

Проведенное в настоящей статье детальное изучение морфологии вулкана Пийпа с использованием данных, полученных при съемке многолучевыми эхолотами, дает основание детализировать эти особенности, и сделать заключение о наличии кратера на Северной постройке. На Южной постройке предполагается наличие кратера, западная стенка которого к настоящему времени была разрушена с образованием обломочного потока.

Лавовые потоки широко распространены на склонах вулкана Пийпа и выделяется два их типа: потоки, начинающиеся от вершин и потоки, возникающие при трещинных излияниях на склонах вулкана. Первые из них являются наиболее протяженными по сравнению со вторыми, количество которых резко увеличивается на глубинах более 1500 м. Для Северной вершины максимальное количество лавовых потоков располагается в секторах 300–320° и 0–40°, а для Южной вершины — в секторах 100–120°, 140–160° и 180–200°. В пределах Центральной постройки лавовые потоки отсутствуют.

Лавовые потоки Северной постройки лучше выражены в рельефе склона по сравнению с лавовыми потоками Южной постройки, но наибольшую длину имеют лавовые потоки последней, что может быть связано с различной вязкостью лав, изливающихся из этих построек.

Концентрация побочных конусов в пределах северо-западного сектора вулкана Пийпа на глубинах больше 2000 м, вероятно, обусловлена тем, что к этому сектору подходит осевая часть грабена Командор. Вулкан Пийпа ограничивается западным бортом грабена, и разрывные нарушения этой структуры могли служить подводящими каналами для магмы.

Поле современных и палеотектонических напряжений на вулкане Пийпа. В вулканических районах полигональные вулканические постройки с длительной историей эволюции, подобные вулкану Пийпа, используются для изучения современных и палеотектонических напряжений (Adiyaman et al., 1998; Nakamura, 1977; Paulsen, Wilsen, 2009). На вулканах распределение побочных конусов связано с зонами концентрации подводящих даек (трещин) и если поле напряжений является однородным, т.е. при равенстве максимальных (S_H) и минимальных (S_h) напряжений сжатия, трещины распределяются радиально относительно вершины вулкана.

Когда поле тектонических напряжений является неоднородным ($S_H > S_h$) трещины распределяются в направлении S_H .

Распределение побочных конусов и, соответственно трещин, на склонах вулкана Пийпа является неоднородным, поэтому для определения S_H мы использовали метод, предложенный в работе (Nakamura, 1977) и дополненный в работе (Paulsen, Wilson, 2010). Согласно этому методу для определения простирания S_H и трещин, были проведены линии по которым были выстроены центры побочных конусов и начальные точки трещинных излияний и определено их простирание. Дополнительно к этому проводилось определение ориентировки длинных осей вытянутых конусов.

На склонах подводного вулкана Пийпа нами было обнаружено 26 побочных конусов и 18 трещинных излияний, которые были использованы для определения характера тектонических напряжений. Распределение побочных конусов и трещинных излияний, как было показано, является неравномерным, поэтому при проведении линий, вдоль которых выстраиваются конусы и трещинные излияния, были использованы дополнительные критерии, а именно: линии должны были соединять максимально количество близкорасположенных точек и азимуты линий должны быть максимально близкими друг к другу. При проведении линий учитывалось простирание немногочисленных разрывных нарушений на вулкане Пийпа, а также принималось во внимание ориентировка разломов грабена Командор.

В результате проведенного анализа была получена карта системы линий по которым выстраиваются побочные конуса и начальные точки трещинных излияний (рис. 7а), и установлено, что из 28 определенных значений простирания линий, большинство располагается в интервале 20–60° (рис. 7б). Это направление определяется наличием питающих даек, которые простираются в направлении S_H , и характеризует поле современных или палеотектонических напряжений.

Поле современных тектонических напряжений можно определить по ориентировке осей максимального сжатия в механизмах очагов землетрясений, происходящих в районе массива Вулканологов и вулкана Пийпа. Вулкан Пийпа располагается между двумя разломными зонами Альфа и Беринга, которые являются правосторонними сдвигами (рис. 1а). В настоящее время, судя по распределению эпицентров землетрясений, активным является только зона разломов Беринга и к ней приурочена большая часть землетрясений, происходящих в пределах Командорского отрезка Алеутской дуги и

имеющих достаточно высокие магнитуды. Так, за инструментальный период наблюдений в тыловой части Командорского блока было зарегистрировано несколько событий с магнитудой 7 и выше. Последним и наиболее примечательным землетрясением с $M_w=7.8$, которое произошло 17.07.2017 в зоне разломов Беринга является Ближне-Алеутское землетрясение (рис. 1а) (Чебров и др., 2017; Lay et al., 2017). Механизм очага Ближне-Алеутского землетрясения (рис 7б) и механизмы его афтершоков соответствуют правостороннему сдвигу по плоскости парал-

лельной простиранию зоны разломов Беринга. Среднее положение осей максимального сжатия для этого землетрясения, и его афтершоков имеет азимут 350° .

Механизмы других сильных событий, происходящих вдоль зоны разломов Беринга, также представляют собой преимущественно правосторонние сдвиги по плоскости разрыва, соответствующей простиранию Командорского сегмента Алеутской дуги (Cormier, 1975; Geist, Scholl, 1994; Newberry et al., 1986). Роза-диаграмма азимутов осей S_H , взятых из каталога (Heidbach

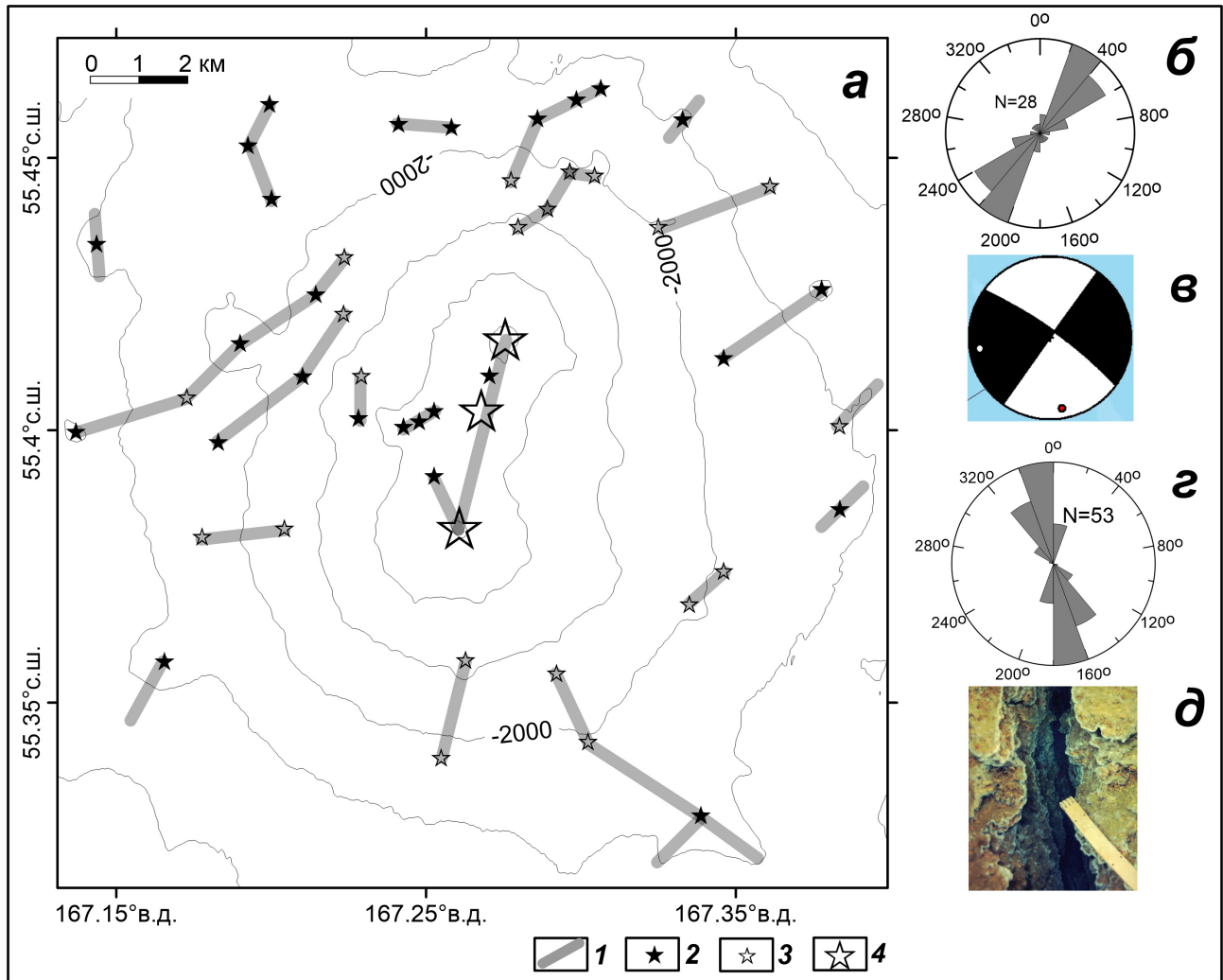


Рис. 7. Система линий (1), по которым были сгруппированы побочные конусы (2), начальные точки трещинных излияний (3) и вершинные постройки (4) (а); роза-диаграмма ориентировки линий, по которым группируются побочные конусы и трещинные излияния (б); диаграмма механизма очага Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017, $M_w = 7.8$ (нижняя полусфера) (Чебров и др., 2017) (в); роза-диаграмма осей S_H , данные из каталога (Heidbach et al., 2016) с дополнениями для основного толчка и афтершоков Ближне-Алеутского землетрясения (Чебров и др., 2017) (г); трещина растяжения в гидротермальных отложениях Южной постройки. Снимок сделан во время погружения ГОА «Мир» (Сагалевиц и др., 1992) (д).

Fig. 7. System of lines (1) along which side cones (2), initial points of fissure lava flows (3), and summit edifices (4) are grouped (a); rose diagram of orientation lines along which side cones and fissure lava flows are grouped (б); focal mechanism of the Near-Aleutian earthquake 17.07.2017, $M_w = 7.8$ (lower hemisphere) (Chebrov et al., 2017) (в); S_H axis rose diagram, data from catalog (Heidbach et al., 2016) with additions for the main shock and aftershocks of the Near-Aleutian earthquake (Chebrov et al., 2017) (г); photo of the open fissure in the hydrothermal deposits of the Southern summit (д). The photo was made during «Mir» dive (Sagalevich et al., 1992).

et al., 2016), с дополнениями для основного толчка и афтершоков Ближне-Алеутского землетрясения (Чебров и др., 2017) показывает, что почти половина осей S_H располагается в секторе $340-360^\circ$ со средним значением 350° (рис. 7з). Это значение отличается от азимутов простирания подводящих даек (рис. 7б), полученных по распределению побочных конусов и трещинных излияний и, следовательно, свидетельствует об изменении поля тектонических напряжений со временем.

Вулкан Пийпа, входящий в состав массива Вулканологов, судя по линейным магнитным аномалиям (Валяшко и др., 1993), находится на океанической коре возрастом 15–12 млн лет. Абсолютный возраст формирования комплексов пород, слагающих основание и постройку вулкана Пийпа, является неустановленным. Изучение полученных драгированием и опробованием с ГОА «Мир» образцов коренных пород показало, что образование вулкана началось с извержений текучих толеитовых магм, характерных для задугового спрединга (нижний комплекс). Дальнейшее его формирование продолжалось за счет излияний андезитов с бонинитовой тенденцией (средний стратифицированный комплекс) и завершилось формированием стратовулкана островодужного типа во время извержений вязкой дацитовой лавы с высоким содержанием кремнезема (Волицев и др., 1992; Portnyagin et al., 2017; Yagodzinski et al., 1994).

Средний стратифицированный комплекс подразделяется толщей литифицированных алевролитов, предположительно, позднемиоцен-раннеплиоценового возраста на верхнюю и нижнюю части (Селиверстов, 2009). Побочные кратеры вулкана Пийпа, судя по отобранным образцам коренных пород (FS Sonne Fahrtbericht., 2009; RV Sonne Fahrtbericht., 2016), скорее всего, относятся к верхней части среднего комплекса. Это дает основание полагать, что формирование верхней части среднего комплекса произошло после позднего миоцена – раннего плиоцена в поле тектонических напряжений, которое было установлено по распределению побочных конусов и трещинных излияний.

Современный характер поля напряжений, выявленный по механизмам очагов землетрясений, является несколько иным и на подводном вулкане Пийпа проявляется наличием разрывных нарушений в гидротермальных отложениях Южной постройки, выявленных при погружениях на ГОА «Мир» (Сагалевич и др., 1992; Селиверстов и др., 1995). Эти разрывные нарушения представлены зияющими трещинами растяжения шириной до 20–30 см, которые ориентированы по азимуту 340° (рис. 7д). Наиболее крупная из них в виде отдельных

кулисных фрагментов прослеживается в гидротермальных отложениях Южной вершины на расстоянии более 1 км. Кроме зияющих трещин в пределах Южной вершины широко распространены трещины, которые маркируются на гидротермальных отложениях линейными зонами развития бактериальных матов с наличием активных гидротермальных построек. Трещины в гидротермальных отложениях могут быть перекрыты осадками и в этом случае линейные зоны бактериальных матов появляются на поверхности осадка. В обоих случаях линейные зоны бактериальных матов, связанные с трещинами ориентированы, главным образом, в направлении $340-350^\circ$. Поскольку простирание трещин в гидротермальных отложениях Южной вершины совпадает с простиранием осей максимального сжатия, определяемого по механизмам очагов землетрясений, то можно сделать заключение, что трещины формируются в современном поле напряжений. Таким образом, очевидно, что характер поля тектонических напряжений, существовавший, предположительно, с позднего миоцена – раннего плиоцена, к настоящему времени изменился. Возможная причина этого изменения может заключаться в следующем.

Структурный рисунок Командорской котловины определяется наличием нескольких региональных зон разрывных нарушений, одной из которых является зона разломов Альфа (рис. 1а). Зоны разломов протягиваются от хребта Ширшова до континентального склона полуострова Камчатка и ориентированы в СЗ-ЮВ направлениях. Между ними располагаются оси растяжения/спрединга, выделенные по магнитным (Валяшко и др., 1993) и структурным (Vaganov et al., 1991) данным. Во время формирования коры Командорской котловины зоны разломов и оси спрединга были активными и формирование массива Вулканологов и вулкана Пийпа происходило вследствие растяжения земной коры в южной части Командорской котловины при правосторонних смещениях между структурами западного сектора Алеутской дуги и Командорской котловиной по зонам разломов Беринга и Альфа.

Вулкан Пийпа имеет, по крайней мере, позднемиоцен – раннеплиоценовый возраст и ориентировка групп побочных конусов и трещинных излияний, определенная в настоящей работе, скорее всего, отражает характер поля напряжений, существовавший в это время между активными зонами разломов Беринга и Альфа. Современное поле напряжений в районе вулкана Пийпа, как было показано, отличается от позднемиоцен – раннеплиоценового поля напряжений. Если судить по отсутствию эпицентров землетрясений вдоль зоны разломов Альфа,

то это отличие могло быть связано с прекращением тектонической активности на данном разломе и, вследствие этого, изменения характера поля тектонических напряжений, которое в настоящее время определяется только смещениями вдоль зоны разломов Беринга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые данные, полученных с помощью многолучевых эхолотов, дали возможность построить детальные батиметрические карты подводного вулкана Пийпа, расположенного в южной части Командорской котловины вблизи Командорских островов. Анализ этих карт, выполненный в настоящей работе, позволил получить более объективные представления об особенностях морфологии вулкана Пийпа и на этом основании сделать ряд выводов.

На вершине Северной постройки выявлен небольшой кратер, а на вершине Южной постройки предположительно существовал кратер, от которого к настоящему времени осталась только его восточная стенка.

На Северной постройке проявления гидротермальной активности сосредоточены в кратере и на его побочном конусе, а на Южной — на вершине восточной стенки кратера.

Лавовые потоки, начинающиеся от вершин Северной и Южной построек, различаются как по выраженности в рельефе, так и по протяженности, что может быть обусловлено вязкостью изливавшихся лав.

По распределению побочных конусов и трещинных излияний определено палеонапряжение во время их образования, предположительно, после позднего миоцена — раннего плиоцена, которое отличается от современного поля тектонических напряжений. Особенности последнего были установлены по механизмам очагов землетрясений вдоль зоны правостороннего сдвига Беринга и простирающую трещин растяжения в современных гидротермальных отложениях. Изменение характера поля тектонических напряжений, вероятно, было вызвано прекращением тектонической активности вдоль зоны разломов Альфа.

Благодарности. Мы благодарны В.-Кр. Дулло, начальнику рейса SO201-2 на НИС «Зоне», команде и научным сотрудникам рейсов SO201-2 SO249-2 за поддержку во время проведения батиметрических исследований в экспедициях.

Экспедиции финансировались Министерством образования и науки Германии (проекты КАЛЬМАРИ БЕРИНГ), участие российских ученых оплачивалось за счет грантов РФФИ, РНФ и Президиума Российской академии наук. Данная работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН № 0128-2021-0004.

Список литературы [References]

- Богданова О.Ю., Горшков А.И., Баранов Б.В. и др.* Гидротермальные образования подводного вулкана Пийпа (Командорская котловина) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 49–62 [*Bogdanova O.Yu., Gorshkov A.I., Baranov B.V., Seliverstov N.I et al.* Hydrothermal deposits from Piip submarine volcano, Komandorsky Basin // *Vulkanology and seismology*. 1990. V. 11. P. 354–374].
- Валяшко Г.М., Чернявский Г.Б., Селиверстов Н.И., Иваненко А.Н.* Задуговой спрединг в Командорской котловине // ДАН. 1993. Т. 328. № 2. С. 212–216 [*Valyashko G.M., Chernyavsky G.B., Seliverstov N.I., Ivanenko A.N.* Back arc spreading in the Komandorsky basin // *Doklady Earth Sciences*. 1993. V. 338. № 3. P. 212–216 (in Russian)].
- Волынец О.Н., Колосков А.В., Ягодзинский Г.М. и др.* Бонинитовая тенденция в лавах подводного вулкана Пийпа и его обрамления (западная часть Алеутской дуги). 1. Геохимия, петрохимия и минералогия // Вулканология и сейсмология. 1992. № 1. С. 3–23 [*Volynets O.N., Koloskov A.V., Yagodzinsky G.M. et al.* A Boninite Trend in the Submarine Lavas of Piip volcano and Surroundings, Western Aleutian Arc. 1. Geology, Petrochemistry, Mineralogy // *Vulkanology and seismology*. 1992. V. 11. P. 1–22].
- Галкин С.В., Ивин В.В.* Биологические исследования в Беринговом море с использованием телеуправляемого аппарата «Команч» // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 170–172 [*Galkin S.V., Ivin V.V.* Biological studies in the Bering Sea with the remote underwater vehicle Comanche // *Oceanology*. 2019. V. 59. P. 153–154. <https://doi.org/10.1134/S000143701901003X>].
- Галкин С.В., Мордухович В.В., Крылова Е.М. и др.* Исследование экосистем гидротермальных выходов и холодных высачиваний в Беринговом море (82-й рейс научно-исследовательского судна «Академик М.А. Лаврентьев») // Океанология. 2019. Т. 59. № 4. С. 687–690 [*Galkin S.V., Mordukhovich V.V., Krylova E.M. et al.* Comprehensive research of ecosystems of hydrothermal vents and cold seeps in the Bering Sea (Cruise 82 of the R/V Akademik M.A. Lavrenyev) // *Oceanology*. 2019. V. 59. № 4. P. 618–621. <https://doi.org/10.1134/S0001437019040052>].
- Мелекестев И.В.* Особенности геоморфологии и истории формирования массива Вулканологов в Беринговом море (новая версия) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 1. Вып. 40. С. 200–212 [*Melekestev I.V.* The peculiarities of geomorphology and formation history of the Volcanologists massif in the Bering Sea (the new version) // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2014. № 4.(40). P. 200–212 (in Russian)].
- Полоник Н.С.* Изучение газонасыщенного гидротермального флюида подводного вулкана Пийпа // Материалы XXI региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы» / Главный редактор: академик РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. С. 197–199 [*Polonik N.S.* Study of gas-saturated hydrothermal fluid of the Piip submarine volcano // *Processing of XXI regional scientific conference*

- «Volcanic activity and associated processes» / Chief Editor: academician of the RAS Gordeev E.I. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2018. P. 197–199 (in Russian)].
- Сагалевич А.М., Торохов П.В., Матвеевков В.В. и др.* Гидротермальная проявления подводного вулкана Пийпа (Берингово море) // Известия РАН. Серия геологическая. 1992. № 9. С. 104–114 [Sagalevich A.M., Torokhov P.V., Matveenkov V.V. et al. Hydrothermal occurrences of submarine Piip volcano (Bering Sea) // Proceedings Academy of Sciences. Geological series. 1992. № 9. P. 104–114 (in Russian)].
- Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // М.: Научный Мир, 1998. 164 с. [Seliverstov N.I. Bottom structure offshore the Kamchatka and geodynamics of Kurile-Kamchatka and Aleutian island arcs junction // М: Nauchyi Mir, 1998 164 p. (in Russian)].
- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Петропавловск-Камчатский: Изд. КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с. [Seliverstov N.I. Geodynamics of Kurile-Kamchatka and Aleutian island arcs junction // Petropavlovsk-Kamchatsky: Vitus Bering KamSU, 2009. 191 p. (in Russian)].
- Селиверстов Н.И.* Подводные морфоструктуры Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2013. 162 с. [Seliverstov N.I. Submarine morphologic structures of Kurile-Kamchatka and Aleutian island arcs // Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2013. 162 p. (in Russian)].
- Селиверстов Н.И., Авдейко Г.П., Иваненко А.Н. и др.* Новый подводный вулкан в западной части Алеутской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 1986. № 4. С. 3–16 [Seliverstov N.I., Avdeiko G.N., Ivanenko A.N. et al. A New submarine volcano in the West of the Aleutian Island Arc // Vulkanology and seismology. 1990. V. 8. № 4. P. 473–495 (in Russian)].
- Селиверстов Н.И., Баранов Б.В., Егоров Ю.О., Шкира В.А.* Новые данные о строении южной части Командорской котловины по результатам 26 рейса НИС «Вулканолог» // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 3–20 [Seliverstov N.I., Baranov B.V., Yegorov Yu.O., Shkira V.A. New Data on the Structure of the Southern Komandorsky Basin Provided by cruise 26 of RV «Vulkanolog» // Vulkanology and seismology. 1990. V. 10. № 4. P. 499–524].
- Селиверстов Н.И., Торохов П.В., Баранов Б.В.* Подводный вулкан Пийпа: структурно-тектонический контроль, геологическая структура и гидротермальная активность // Вулканология и сейсмология. 1995. № 2. С. 50–71 [Seliverstov N.I. Torokhov P.V., Baranov B.V. Piip submarine volcano: Structural-Tectonic Control, Geologic Structure, and Hydrothermal Activity // Vulkanology and seismology. 1995. № 2. P. 169–191].
- Торохов П.В., Таран Ю.А., Сагалевич А.М. и др.* Изотопный состав метана, углекислого газа и карбонатов термальных выходов подводного вулкана Пийпа (Берингово море) // ДАН. 1991. Т.318. № 3. С.728–732 [Torokhov P.V., Taran Yu.A., Sagalevich A.M. et al. Isotopic composition of methane, carbon dioxide gas and carbonates of the thermal vents of the Piip submarine volcano (Bering Sea) // Doklady Earth Sciences. 1991. V. 318. № 3. С. 728–732 (in Russian)].
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др.* Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с Mw=7.8 на границе Командорской сейсмической брешии // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3. выпуск 35. С. 22–25 [Chebrov D.V., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R. et al. Near-Aleutian earthquake of 17.07.2017 with Mw=7.8 on the boundary of Komandorsky seismic gap // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2017. № 3(35). P. 22–25 (in Russian)].
- Adiyaman O., Chorowicz J., Kose O.* Relationships between volcanic patterns and neotectonics in Eastern Anatolia from analysis of satellite images and DEM // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1998. V. 85. Iss. 1-4. P. 17–32. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00047-X).
- Baranov B.V., Seliverstov N.I., Muravev A.V., Muzurov E.L.* The Komandorsky basin as a product of spreading behind a transform plate boundary // Tectonophysics. 1991. V. 199. № 2–4. P. 237–270. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90174-Q](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90174-Q).
- Cormier V.F.* Tectonics near the junction of the Aleutian and Kuril-Kamchatka Arcs and a mechanism for Middle Tertiary magmatism in the Kamchatka Basin // Geological Society of America Bulletin. 1975. V. 86. № 4. P. 443–453. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86<443:TNTJOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86<443:TNTJOT>2.0.CO;2).
- FS SONNE Fahrtbericht / Cruise Report SO201-2: KALMAR (Kurile-Kamchatka and Aleutian MARGinal Sea-Island Arc Systems): Geodynamic and Climate Interaction in Space and Time, Busan/Korea - Tomakomai, Japan, 30.08. - 08.10.2009, Eds.: Dullo W.-Ch., Baranov B., van den Bogaard Ch., 2009. V. 35. 91 p.
- Gaedicke C., Baranov B., Seliverstov N., Alexeiev D. Tsukanov N. Freitag, R.* Structure of an active arc-continent collision area: the Aleutian-Kamchatka junction // Tectonophysics. 2000. V.325. P. 63–85. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00131-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00131-1).
- Geist E.L., Scholl D.W.* Large-scale deformation related to the collision of the Aleutian Arc with Kamchatka // Tectonics. 1994. V.13. P. 538–560. <https://doi.org/10.1029/94TC00428>.
- Heidbach O., Rajabi M., Reiter K., Ziegler M.* WSM Team: World Stress Map Database Release / GFZ Data Services. 2016. V. 1.1. <https://doi.org/10.5880/WSM.2016.001>.
- Glasby G.P., Cherkashov G.A., Gavrilenko G.M. et al.* Submarine hydrothermal activity and mineralization on the Kurile and western Aleutian island arcs, N.W. Pacific // Marine geology. 2006. V. 231. Iss. 1–4. P. 163–180. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.06.003>.
- Lay Th., Ye L., Bai Y. et al.* Rupture Along 400 km of the Bering Fracture Zone in the Komandorsky Islands Earthquake (MW 7.8) of 17 July 2017 // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. Iss. 24. P. 12161–12169. <https://doi.org/10.1002/2017GL076148>.
- Nakamura K.* Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation – principle and proposal // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1977. V. 2. Iss. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/BF01637099>.

- Newberry J.T., Laclair D.L., Fujita K.* Seismicity and tectonics of the far western Aleutian Islands // *Geodynamics*. 1986. V. 6. Iss. 1–4. P. 13–32.
- Paulsen T.S., Wilson T.J.* Structure and age of volcanic fissures on Mount Morning: A new constraint on Neogene to contemporary stress in the West Antarctic Rift, southern Victoria Land, Antarctica // *GSA Bulletin*. 2009. V. 121; № 7/8. P. 1071–1088. <https://doi.org/10.1130/B26333.1>.
- Paulsen T.S., Wilson T.J.* New criteria for systematic mapping and reliability assessment of monogenetic volcanic vent alignments and elongate volcanic vents for crustal stress analyses // *Tectonophysics*. 2010. V. 482. Iss. 1–4. P. 16–28.
- Portnyagin M., Hoernle K., Werner R., Baranov B., Hauff F., Yogodzinski G.* Submarine Piip Volcano, Western Aleutian Arc: Temporal Evolution from Back-Arc Rift to Island-Arc Stratovolcano // *AGU Chapman Conference*. Hobart, Tasmania, Australia, 27 January – 3 February 2017. P. 33–34.
- RV SONNE Fahrtbericht /Cruise Report SO249 BERING – Origin and Evolution of the Bering Sea: An Integrated Geochronological, Volcanological, Petrological and Geochemical Approach. Leg 1: Dutch Harbor (U.S.A.) – Petropavlovsk-Kamchatsky (Russia) 05.06.2016 – 15.07.2016 Leg 2: Petropavlovsk-Kamchatsky (Russia) – Tomakomai (Japan) 16.07.2016 – 14.08.2016. Eds.: Werner R. et al., V. 30, 2016, 89 p. <https://doi.org/10.3289>.
- Taran Y.A., Torokhov P.V., Pokrovsky B.G., Shabayeva I.Y.* Isotopic composition of mineral precipitates and free gas associated with hydrothermal vents of Piip submarine volcano, Bering Sea // *Geochemical Journal*. 1992. V. 26. P. 291–297. <https://doi.org/10.2343/geochemj.26.291>.
- Torokhov P.V., Taran Y.A.* Hydrothermal fields of the Piip submarine volcano, Komandorsky Back-Arc Basin: Chemistry and origin of vent mineralization and bubbling gas // *Bulletin of the Geological Society of Denmark*. 1994. V. 41. P. 55–64.
- Yogodzinski G.M., Kelemen P.B.* Slab melting in the Aleutians: implications of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V. 158. Iss.1–2. P. 53–65. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00041-7).
- Yogodzinski G.M., Volynets O.N., Koloskov A.V. et al.* Magnesian andesites and the subduction component in a strongly calc-alkaline series at Piip volcano, Far Western Aleutians // *Journal of Petrology* 1994. V. 35. № 1. P. 163–204. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.1.163>.

MORPHOLOGY OF THE PIIP SUBMARINE VOLCANO IN THE KOMANDORSKY BASIN BASED ON MULTIBEAM ECHOSOUNDER DATA

B.V. Baranov¹, R. Werner², V.A. Rashidov³, N.V. Tsukanov¹, K.A. Dozorova¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 117997; e-mail: bbaranov@ocean.ru*

²*GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany, 24148; e-mail: rwerner@geomar.de*

³*Institute of Volcanology and seismology, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006,*

We analyzed the bathymetric data obtained during the cruises on the German research vessel “Sonne” using multibeam echosounders within the framework of the Russian-German projects KALMAR (cruise SO201-2, 2009) and BERING (cruise SO249-2, 2016) in the Komandorsky Basin of the Bering Sea. Detailed bathymetric maps of the Piip submarine volcano were constructed. New morphological features of its summit edifices and their age relations are described, hydrothermal activity confined to the edifices is localized, and all side cones and lava flows are mapped. Based on the flank cones and fissure lava flows alignments we determined the tectonic paleostress that existed at the time of their formation, presumably after the Late Miocene-Early Pliocene. It differs from the recent tectonic stress caused by right-lateral displacements along the Bering fault zone.

Keywords: Bering Sea, Komandorsky Basin, Piip volcano, bathymetric survey.

Поступила в редакцию 20.01.2021

После доработки 14.05.2021

Принята в печать 28.06.2021