

## ОПОЛЗНЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОСТРОЙКАХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

© 2022 А.О. Мазарович

*Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: amazarovich@yandex.ru*

Поступила в редакцию 16.02.2022; после доработки 15.03.2022; принята в печать 27.03.2022

В северо-восточной Атлантике расположены (с юга на север) архипелаги вулканических островов Зеленого Мыса, Канарский, Селваженш, Мадейра и Азорский. Они были сформированы на океанической коре в миоцен-четвертичное время. Анализ геологического строения тридцати островов позволяет сделать вывод о том, что половина из них в ходе своей эволюции были разрушены в разное время катастрофическими оползневыми процессами. На некоторых из этих островов такие события происходили неоднократно. Они вызывали цунами и формировали крупные оползневые массы в прилегающих частях океана. На основании представленных данных сделано предположение о вулканических сооружениях, которые могут быть разрушенными оползневыми процессами. Предпосылкой для возникновения оползней на вулканической постройке могло быть смещение ее центра тяжести.

*Ключевые слова: острова Зеленого Мыса, Канарские, Азорские, вулканическая постройка, оползень.*

### ВВЕДЕНИЕ

Северо-восточную часть Атлантического океана можно отнести к относительно «безопасным» областям Земли. Здесь отсутствуют активные окраины с сейсмофокальными зонами и островными дугами. Вместе с тем, время от времени, в этом регионе происходили природные катастрофы разного масштаба, причиной которых были геологические процессы. Достаточно упомянуть землетрясение (M — 8.5–9.0) юго-западнее побережья Португалии и цунами в Лиссабоне в 1755 г. (Zitellini et al., 2001).

Целью статьи представляется обзор уже произошедших масштабных оползневых процессов на вулканических постройках в северо-восточной части Атлантического океана, а также выявление объектов, на которых, потенциально, могут произойти природные катастрофы. В задачу автора не входит обстоятельное рассмотрение геологии островов (прилагаемый список литературы позволит читателю, при необходимости, получить более подробную информацию). Опасные природные явления, связанные с ливнями, волновой деятельностью, наводнениями и эрозионными процессами, а также обвалы в статье рассматриваться не будут.

### ТЕРМИНЫ В СТАТЬЕ

Активный вулкан — вулкан, извержения которого известны в течение исторического времени

Действующий вулкан — вулкан, извержения которого происходили за последние 5–10 тыс. лет

Рифтовая зона — линейная структура растяжения вулканической островной постройки, сложенная лавовыми потоками, шлаковыми конусами и роями крутопадающих даек

### КРАТКИЙ ОЧЕРК ГЕОЛОГИИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ И ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

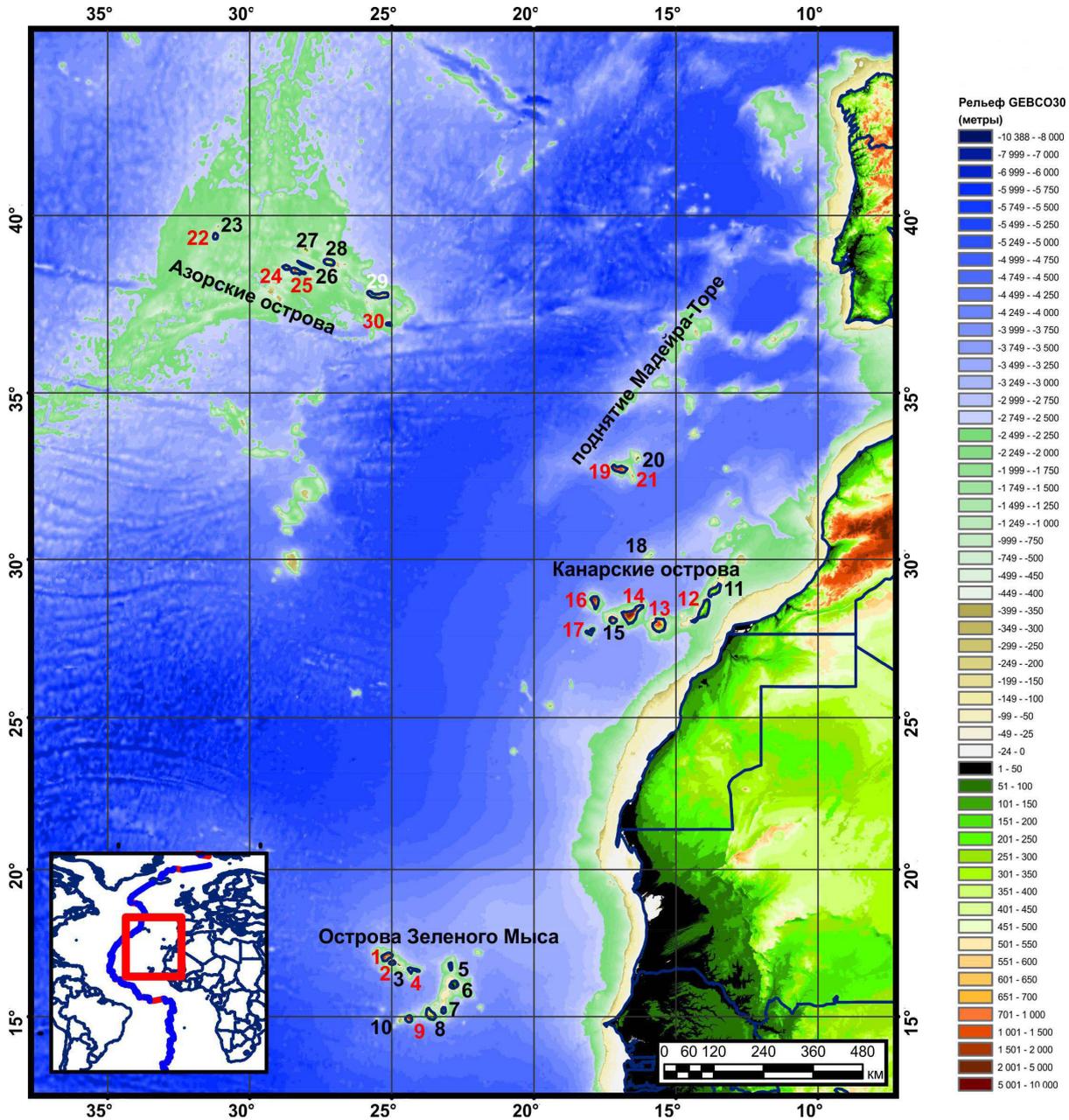
В пределах северо-восточной Атлантики расположены (с юга на север) архипелаги вулканических островов Зеленого Мыса, Канарский, Селваженш, Мадейра и Азорский, которые, иногда, объединяются (Mitchell-Thome, 1976) единым географическим названием Макаронезия (рис. 1).

**Архипелаг Островов Зеленого Мыса** (рис. 1) расположен в 550–800 км западнее побережья Сенегала. Он состоит из 10 крупных и 8 небольших

островов, образующих две цепи — северную Наветренную (Борлавету) и южную — Подветренную (Сотавенту).

*Остров Санту-Антан* (Тектоника..., 1990; Masson et al., 2008) расположен в западной части цепи Борлавету. Он построен в результате дея-

тельности трех плиоцен-позднеплейстоценовых вулканических сооружений, которые сложены фонолитовыми, базальтовыми и нефелинитовыми лавами, пирокластическими образованиями и туфами с возрастом 0.17–0.09 млн лет. На юго-восточном склоне и подножии острова



**Рис. 1.** Названия географических объектов северо-восточной Атлантики, упомянутых в тексте. Цифры; острова (красные — с крупными оползнями): 1 — Санту-Антан; 2 — Сан-Висенти; 3 — Санта Лузия, Бранку, Разу; 4 — Сан-Николау; 5 — Сал; 6 — Боавишта; 7 — Маю; 8 — Сантьягу; 9 — Фогу; 10 — Брава; 11 — Лансароте; 12 — Фуэртевентура; 13 — Гран Канария; 14 — Тенерифе; 15 — Гомера; 16 — Пальма; 17 — Иерро; 18 — Селваженш; 19 — Мадейра; 20 — Порто Санто; 21 — Десерташ; 22 — Флореш; 23 — Корво; 24 — Файял; 25 — Пику; 26 — Сан-Жоржи; 27 — Грациоза; 28 — Терсейра; 29 — Сан-Мигель; 26 — Санта-Мария.

**Fig. 1.** Names of geographic features of the northeast Atlantic mentioned in the text. Numbers are islands (red — with large landslides): 1 — Santo Antão; 2 — São Vicente; 3 — Santa Luzia, Branco, Razu; 4 — São Nicolau; 5 — Sal; 6 — Boavista; 7 — Maio; 8 — Santiago; 9 — Fogo; 10 — Brava; 11 — Lanzarote; 12 — Fuerteventura; 13 — Gran Canaria; 14 — Tenerife; 15 — Gomera; 16 — La Palma; 17 — El Hierro; 18 — Selvagens; 19 — Madeira; 20 — Porto Santo; 21 — Desertas; 22 — Flores; 23 — Corvo; 24 — Faial; 25 — Pico; 26 — São Jorge; 27 — Graciosa; 28 — Terceira; 29 — São Miguel; 26 — Santa Maria.

установлен (Masson et al., 2008) бугорчатый рельеф, происхождение которого связывают с формированием двух крупных оползней и обвалов с возрастными >500 и 200–400 тыс. лет. В обвальном цирке на западе острова, позже, сформировался вулканический конус Топе де Короас высотой 1979 м (рис. 2). В древней части острова, на его северном склоне с крутизной до 22° также развиты обвально-оползневые отложения с возрастом 0.7–1.4 млн лет.

*Остров Сан-Висенте* (Тектоника..., 1990; Ancochea et al., 2010; Massonet al., 2008) был сфор-

мирован в результате плиоцен-плейстоценовых вулканических процессов. Наиболее древние щелочные пиллоу-лавы, с возрастом 9 млн лет слагают вместе с пироксенитами, габбро-сиенитами, нефелиновыми сиенитами и комплексом роев даек основание острова. Северо-восточная часть палеовулкана Сан-Висенти, который был сформирован 6.5–4.5 млн лет назад была разрушена гигантским оползнем, предположительно, 4.5–3.1 млн лет назад, после которого начала формироваться вулканическая постройка Монте Верде (рис. 3).



**Рис. 2.** Оползневой цирк с новообразованным вулканическим конусом Топе де Короа на о. Санту-Антан. Вид с юго-востока (<https://earth.google.com>).

**Fig. 2.** Landslide cirque with newly formed volcanic cone Tope de Coroa on Santo Antão Island. View from the southeast (<https://earth.google.com>).



**Рис. 3.** Вулканическая постройка Монте Верде на о. Сан-Висенти. Вид с юго-востока. Фото автора.

**Fig. 3.** Monte Verde volcanic edifice on São Vicente island. View from the southeast. Photo by the author.

*Остров Сан-Николау* (Тектоника..., 1990; Masson et al., 2008) возник в результате четырех этапов вулканической деятельности с возрастными от >6.2–5.7 млн лет до <100 тыс. лет. На ранних этапах сформировался эффузивно-пирокластический комплекс щелочно-пикритового и меланефелинитового составов. Выше по разрезу

развиты пирокластические и эффузивные комплексы сложенные нефелинитами и базанитами, которые были прорваны дайками фонолитов. На последнем этапе был сформирован новейший вулканический комплекс. Масштабные оползневые тела установлены на северном и южном склонах острова (Masson et al., 2008).

*Остров Брава* (Madeira et al., 2009) расположен в западной части гряды Сотавенту и сложен тремя вулканическими комплексами. Нижний представлен анкаратритовыми и нефелинитовыми пиллоу-лавами, брекчиями и гиалокластитами сформированными на подводном поднятии. Они прорваны интрузиями сиенитов, пироксенитов и карбонатитов. Верхний комплекс плейстоцен-голоценового возраста сложен, в основном, фонолитами, сформированными при извержениях фриатического и плинианского типов.

*Остров Фогу* (Hildner, 2011; LeBas et al., 2007; Richter et al., 2016) представляет собой вершину активной вулканической постройки, общая высота которой над дном прилегающей глубоководной котловины достигает почти 6000 м (рис. 4). На ней, со времени первых португальских поселений (~1500 г.), было задокументировано не менее 27 извержений, наиболее масштабные из

которых были в 1785, 1799, 1847, 1852, 1857 и 1951 гг. Последние произошли в 1995 и 2014–2015 гг. и привели к эвакуации людей и повреждению строений лавовыми потоками. Формирование постройки происходило в четыре этапа. На первом ~4.5 млн лет назад были сформированы комплексы карбонатитов и щелочных базальтов подводной горы. Они были перекрыты субэральными лавами щелочных базальтов на которые, в свою очередь, изливались высокощелочные базальты и лавы среднего состава. Катастрофическое разрушение восточного склона постройки оползнем произошло ~70 тыс. лет назад. В результате был сформирован оползневой цирк диаметром около 8 км, на восточном крае которого расположен вулканический конус Пикю де Фогу с высотой вершины 2829 м над уровнем моря. Он начал формироваться ~62 тыс. лет назад, с последующим заполнением цирка лавами щелочных базальтов, которое продолжается до настоящего времени. Разрушение вулкана привело к формированию крупных оползневых масс и образованию цунамигенных отложений на о-вах Сантьягу и Майю (расстояние 50 и 120 км соответственно) в результате цунами с высотой порядка 170 м (Masson et al., 2008).



**Рис. 4.** Оползневой цирк с новообразованным вулканическим конусом Пикю на о. Фогу. Вид с юго-востока (<https://earth.google.com>).

**Fig. 4.** Landslide cirque with the newly formed volcanic cone Pico on Fogo Island. View from the southeast (<https://earth.google.com>).

**Архипелаг Канарских островов** (Carracedo et al., 2015; Cocaet al., 2014; Hunt et al., 2013; Pérez-Torrado et al., 2006; Schmincke, Graf, 2000) входит в одноименную вулканическую провинцию, расположенную западнее побережья Марокко, которая включает семь крупных и нескольких более мелких островов, а также подводные горы (рис. 1). На Канарских островах за последние 2 млн лет произошло 11 крупных оползней, 8 из которых привели к формированию мощных турбидитных отложений в котловине Мадейра.

*Восточные острова архипелага Лансароте и Фуэртевентура* расположены на Восточно-Канарском хребте (Vázquez et al., 2015a) северо-восточного простирания с глубинами от 50 до 200 м. Он имеет ширину от 8 до 20 км и абсолютную высоту 1200 м. Крутизна склонов в среднем составляет 8°, достигая местами на восточном склоне 40°, а на западном — 20°.

*Остров Фуэртевентура* сложен (Acosta et al., 2004; Krastel et al., 2001; Steiner et al., 1998; Stillman, 1999), в основном, вулканитами миоцен-четвертичного возраста, которые подстилаются юрско-меловыми толеитовыми пиллоу-лавами и терригенно-карбонатными комплексами пород океанического основания. Последние прорваны полифазным интрузивным массивом позднеолигоцен-раннемиоценового возраста сложным ультрабазитами, габбро и сиенитами, в которые внедрялись дайки, раннемиоценового (24–17 млн лет) возраста, интенсивность внедрения которых достигает 95%. В миоцене, после регионального перерыва, в субаэральных условиях начали формироваться три крупные вулканические постройки: Северная (>22–12.8 млн лет), Центральная (>22.5–12,8 млн лет) и Южная (20.7–19.3 млн лет). Предполагается, что их высота могла достигать 3000 м. Две последних были разрушены крупными оползнями, последние из которых произошли 15 млн лет назад. Их остатки расположены на западном склоне Восточно-Канарского хребта в виде крупной обвальноподолзневой массы (25×15 км) с крупными (до 11×6 км) блоками и обломочных потоков (65×70 км) на глубинах 2800–3300 м. Южнее установлен (Krastel et al., 2001) обломочный поток Джаналия, с возрастом <2 млн лет.

*Остров Лансароте* (Acosta et al., 2004; Marinoni, Pasquare, 1994, Carracedo et al., 1992) расположен севернее о. Фуэртевентура. Он сложен двумя вулканическими комплексами — доэрозионным миоценовым (15.6–5.7 млн лет) и постэрозионным плиоценовым (<1.2 млн лет). Большую часть острова слагают плейстоценовые лавы. В историческое время на острове произошла активизация вулканических процессов. В 1730–1736 гг. в результате трещинных изверже-

ний на северо-востоке острова около четверти его территории была покрыта потоками лав и пирокластическими образованиями.

*Остров Гран Канария* (Acosta et al., 2004; Funck, Schmincke, 1998; Krastel, Schmincke, 2002; Pérez-Torrado et al., 2006; Schmincke, Graf, 2000) располагается в центральной части Канарского архипелага. Он имеет шельф шириной до 10 км, бровка которого расположена на глубине порядка 125 м. Максимальная высота острова 1949 м. Вулканические процессы на о. Гран Канария началась примерно 14–15 млн лет и происходили в течение трех главных фаз. В миоцене произошло формирование вулканической постройки высотой до 2000 м, сложенной игнимбритами трахитового и риолитового составов. В плиоцене начали формироваться трахит-базанит-фонолитовые вулканические комплексы стратовулкана Рок Нубло, высотой до 3000 м, Позднеплиоценовые-четвертичные базанитовые и нефелинитовые лавы извергались преимущественно на севере острова. Два извержения произошли 3000 лет назад. На острове Гран Канария крупные оползневые процессы происходили в два этапа. В миоценовое время вулканическое сооружение было разрушено оползнями и обвалами с образованием холмистого рельефа дна, в частности, в проливе между о-вами Тенерифе и Гран Канария во время перерыва 9–5 млн лет назад. В конце плиоценовой вулканической фазы стратовулкан Рок Нубло был разрушен крупным оползнем на северном склоне постройки Гран Канария. В акватории расположено тело оползня с крупными (>100 м в поперечнике) блоками, многие из которых сильно брекчированы. Один из них имеет протяженность 1200 м, ширину 800 м и толщину ~300 м.

*Остров Тенерифе* (Criado, Paris, 2005; Hunt et al., 2013), крупнейший остров Канарского архипелага, представляет собой сложное вулканическое сооружение с расчлененным горным рельефом. Оно было создано в результате двух основных вулканических этапов. В течение первого позднемиоцен-плиоценового (16.1–3.2 млн лет) были образованы вулканы на севере (Анага) и северо-западе (Тено) современного острова. Они были разрушены обвальноподолзневыми процессами 4.7–4.1 и 6.3–6 млн лет назад соответственно и сложены сериями базальтовых лав и пирокластических потоков, а также интрузиями трахитового, трахибазальтового и фонолитового составов. После эрозионного перерыва на плиоцен-плейстоценовом этапе в трех рифтовых зонах (северо-восточной, южной и северо-западной) начали формироваться вулканические постройки. В течение этого этапа происходило формирование крупных обвальноподолзневых масс.

На южной ветви возникла новая постройка центрального типа Кальдера дель Рей, которая 200 тыс. лет назад была разрушена оползнями Икод де лос Винос, (<0.15 млн лет) перемещавшимися на север с формированием оползневого цирка Каньядас. На новейшем этапе на его северном обрамлении возникли вулканы Тейде и Пико-Вьехо высоты которых составляют 3715 м и 3125 м соответственно. Они сложены базанитовыми и фонолитовыми лавами и пирокластическими потоками (рис. 5). На севере о. Тенерифе также установлено (Hunt et al., 2013) два крупных оползня с возрастaми 2.4 млн лет (Тигайга) и 0.6–1.4 млн лет.

*Остров Гомера* (Casillas et al., 2010; Hunt et al., 2014; Llanes et al., 2009) представляет собой полифазную вулканическую постройку Альто-де-Гарахонай центрального типа с высотой 1487 м, сложенную тремя комплексами: основания, древнего сооружения и молодого. Первый представлен среднемиоценовыми интрузиями габбро, пироксенитов и сиенитов, пиллоу-лавами, брекчиями, образованными в подводных условиях, которые прорваны роями даек. Древний комплекс был сформирован двумя вулканическими сооружениями с общим возрастом 10.5–6.4 млн лет, которые могли достигать высот 1900 и 2600 м. Они сложены базальтовыми и

трахит-фонолитовыми сериями. Самое молодое вулканическое сооружение на о. Гомера сложено базальтовыми, трахибазальтовыми и трахиандезитовыми лавами с возрастом 5.7–4 млн лет. На севере о. Гомера крупный оползень Тазо произошел 9.4 млн лет назад. Его амфитеатр в настоящее время заполнен обломками обвала, агломератами и лавовыми потоками более молодого вулкана. На рубеже 4 млн лет на всех склонах новой постройки было сформировано 9 крупных обломочных потоков, которые местами перекрыты базальтовыми потоками с возрастом 2.8–2 млн лет.

*Остров Пальма* (Fernández et al., 2021; Staudigel, Schmincke, 1984) расположен на северо-западе Канарского архипелага. На его севере находятся остатки сложного полифазного стратовулкана, выраженного горным рельефом с максимальной высотой 2426 м над уровнем моря (г. Роке де Лос Мучачос). Южнее расположен субмеридиональный хребет Кумбре-Вьеха соответствующий островной рифтовой зоне. Основание о. Пальма представлено пиллоу-лавами, потоками трахитов которые прорваны интрузиями габбро, и многочисленными дайками. Оно формировалось 3–4 млн лет назад в подводных условиях. После перерыва продолжительностью около 1.5 млн лет начали формироваться



**Рис. 5.** Оползневой цирк с новообразованным вулканическим конусом Топе де Тейде на о. Тенерифе. Вид с северо-запада. (<https://earth.google.com>)

**Fig. 5.** Landslide cirque with the newly formed volcanic cone of Tope de Teide on Tenerife island. View from the northwest. (<https://earth.google.com>)

лавовые потоки базальтов и пирокластические образования вулканов Гарафия (1.7–1.2 млн лет) и Табуриенте I (1.08–0.83 млн лет). После оползания склона последнего возобновились излияния базальтовых лав и образование пирокластических потоков, которые привели к созданию двух новых построек Табуриенте II и Кубре Нуева. Возобновление вулканической активности привело к образованию <0.59 млн лет назад нового вулканического сооружения Бехенадо, а затем, южнее, трещинных излияний рифтовой зоны Кумбре-Вьеха (<0.54 млн лет) и привело к возникновению многочисленных небольших вулканических конусов.

*Вулканические постройки о. Пальма* (Fernández et al., 2021) дважды разрушались масштабными оползнями. Западный склон постройки Табуриенте был разрушен гигантским оползнем Плайя де ла Вьета примерно 1 млн лет назад, а вулканический аппарат Кубре Нуева — около 0.6 млн лет назад. Все оползневые массы смещались в западном направлении и слагают обширные области бугорчатого рельефа дна Атлантического океана.

*Остров Иерро* (Gee et al., 2001; Münn et al., 2006; Tsiogalos, 2017) расположен на юго-западе Канарского архипелага. Он представляет собой надводную часть вулкана с максимальной высотой 1500 м (г. Мальрасо). Общая высота постройки над дном океана превышает 5500 м. Она сформировалась в условиях развития ее рифтовых зон (Северо-Восточной, Западной и Южной) в три основных этапа. На первом, 1.2–0.8 млн лет назад, в субаэральных условиях на северо-востоке современного острова формировались потоки лав базанитов стратовулкана Тиньор. Его восточный склон был разрушен огромным оползнем 882–545 тыс. лет назад. После этих событий, 545–176 тыс. лет назад начали изливаться потоки лав трахитов и базанитов стратовулкана Гольфо, восточный склон которого был разрушен двумя крупными оползнями 176–134 (Лас Плайя) и 545–176 (Сан-Андреас) тыс. лет назад. Практически одновременно происходило обрушение (545–200 тыс. лет) и его южного склона (Эль Хулиан). Все упомянутые образования острова прорваны роями даек. На последнем этапе (<145 тыс. лет) активизировались все рифтовые зоны в пределах которых было сформировано 220 вулканических конусов с которыми связаны потоки лав и пирокластические образования щелочных базальтов. Около 13 тыс. лет назад крупный оползень Эль Гольфо разрушил северо-западный склон островной постройки.

*Острова Селваженш* (Santos et al., 2019) расположены в 165 км к северу от о. Тенерифе (рис. 1), которые включают три небольших острова, которые венчают двухвершинную подводную вул-

каническую постройку, формирование которой относят к позднему олигоцену (28.9–24.2 млн лет), а наиболее молодые вулканы имеют возраст 3.4 млн лет. На северных склонах островного шельфа о-вов Селваженш, на глубинах 400–2500 м расположены стенки отрывов оползней протяженностью от 300 до 3100 м. Вдоль юго-восточного фланга расположены 7 незначительных по масштабу стенок отрывов.

*Архипелаг Мадейра* (рис. 1) (BrumDaSilveira et al.; 2012; Fonseca et al., 2002; Klügel et al., 2005; Quartau et al., 2018; Ribeiro, Ramalho, 2010) расположен в южной части хребта Мадейра-Торе и включает вулканические острова (с возрастными наземными постройками) Мадейра (5.3 млн лет — <10 тыс. лет), Десерташ (5.1–1.9 млн лет), Порто Санто (14.3–11.1 млн лет) и скалы.

*Остров Мадейра* представляет собой вулканическое сооружение, сложенное тремя комплексами: нижним (миоцен > 7 млн лет), промежуточным (плио-плейстоцен — ~5.57–1.8 млн лет) и верхним (плейстоцен-голоцен ~1.8–0.007 млн лет). Первый формировался в морских условиях и сложен лавами щелочных базальтов, гидротермально измененными гиалокластитами, которые прорваны дайками. Средний был образован извержениями стромболианского, вулканического и гавайского типов. Верхний — лавами и туфами, сформированными аппаратами центрального типа, а также трещинными излияниями. Последнее извержение произошло 6850 лет назад. В настоящее время на острове известны эмиссии газа и горячие источники. На северном склоне о. Мадейра установлены три крупных оползня и обломочные потоки, дугообразные стенки отрывов которых хорошо выражены как на бровке шельфа, так и в береговой линии. Они имеют протяженность от 15 до 25 км. Оползневые тела смещались в океан на расстояние от 20 до 85 км. Северо-западный оползень сформировал хаотический рельеф, доминантами которого стали блоками диаметром от сотен метров до 3 км. Их высота может достигать 600 м. Юго-восточнее о. Мадейра на площади 4000 км<sup>2</sup> развит бугорчатый рельеф, который создан как подводными вулканическими конусами, так и обвальными оползневыми образованиями т.н. «оползень Фуншал» стенка отрыва которого хорошо выражена и в изгибе береговой линии (Quartau et al., 2018).

*Остров Порто-Санту* (Mitchell-Thome, 1976; Schmidt, Schmincke, 2002) расположен в 45 км к северо-востоку от Мадейры. Он представляет собой остатки древней разрушенной вулканической постройки, которая была сложена преимущественно потоками лав трахитовой серии, гиалокластитами, сформированными в мелководно-морских условиях, которые прорваны

интрузиями и дайками. Древний комплекс несогласно перекрыт морскими и субаэральными пиллоу-лавами, гиалокластитовыми брекчиями с прослоями калькаренитов среднемиоценового возраста. На склонах островной постройки Порту Санту оползни и обломочные потоки развиты на севере и юге. Обломочный материал переместился в океан на 42 и 50 км соответственно. Их стенки отрывов, протяженностью до 10 км хорошо выражены амфитеатрами на бровке островного шельфа.

*Острова группы Десерташ* (Ильеу-Шан, Илья-Дезерта-Гранди и Бужу) (Schwarz, 2004) представляют собой остатки островной вулканической рифтовой зоны, сложенной сериями лавовых потоков, шлаковыми конусами, часто наложенных друг на друга, которые прорваны роями крутопадающих даек. На юго-западе и юго-востоке островов Дезерташ бровки шельфов и береговые линии имеют в плане аркообразную форму шириной около 10 км. Здесь расположены стенки отрывов оползней и обломочных потоков, перемещенных на 20 и 45 км соответственно.

**Азорский архипелаг** (рис. 1) (Azevedo et al., 2006; Carvalho et al., 2001; Hildenbrand et al., 2018; Madeira et al., 2016; Oliveira et al., 2004), состоящий из 9 вулканических островов и скал, находится в районе точки тройного сочленения Северо-Американской, Африканской и Евразийской плит. На первой, на расстоянии около 100 км к западу от оси Срединно-Атлантического хребта расположены вулканические острова Флореш и Корво, которые венчают подводное поднятие север-северо-восточного простирания протяженностью порядка 60 км. Оно возникло на океанической коре с возрастом 9–10 млн лет.

*Остров Флореш* представляет собой вулканическую постройку с максимальной высотой 914 м (г. Морру-Алту), формирование которой началось в конце плейстоцена. Она возвышается над океанским дном на 2500 м. Комплекс основания (2.2–0.67 млн лет) представлен в основном гиалокластитом и потоками базальтов и гавайитов. Верхний комплекс (0.6–0.003 млн лет) сложен лавами трахитов, мудиеритов и гавайитов. На заключительных этапах эволюции постройки (2–3 тыс. лет) возникли шлаковые конусы и фреатомагматические образования. На западе вулканического сооружения о. Флореш установлено три стенки отрывов оползней. Наиболее древняя из которых была сформирована между 1.3 и 1.18 млн лет, а вторая —  $1.18 \pm 0.05$  млн лет назад. Наиболее молодой оползень на о. Флореш, разрушил лавовый поток с возрастом  $314 \pm 30$  тыс. лет. Оползневые тела смещались к западу от острова, на расстояние до 50 км, где существует область холмистого рельефа дна. Этот район асейсмичен, однако, в 1847 и 1980 гг. на о. Флореш

произошли оползни и обвалы береговых клифов, причем первое событие привело к возникновению цунами, которое убило 10 человек, как на самом острове, так и на о. Корво, расположенном в 18 км к северу.

*Остров Корво* (França et al., 2006; Márquez, 2014) представляет собой вулканическое сооружение с кальдерой с максимальным диаметром 2.3 км и глубиной в 300 м. На юго-западном крае кальдеры расположена наиболее высокая отметка острова 720 м. На о. Корво к наиболее древним образованиям относят базальты основания с возрастом 1.5–1 млн лет. Позже была сформирована вулканическая постройка с кальдерой, сложенная потоками щелочных базальтов, трахиандезитов и фонолитов с возрастом 0.7–0.4 млн лет. Последние извержения произошли 80–100 тыс. лет назад на юге острова. Северная и западная часть острова подвержена интенсивной волновой абразии, в результате которой образовались многочисленные оползни и обвалы.

Восточнее Срединно Атлантического хребта расположено Азорские плато, ограниченного изобатой 2000 м — регион со сложным сочетанием хребтов запад-северо-западного простирания, впадин и подводных гор, которые объединяют в область диффузной границы Африканской и Евразийской плит. Вдоль его северного края протягивается рифт Терсейра. Юго-западнее последнего расположена область, в которой наиболее примечательной особенностью представляются два узких субпараллельных хребта северо-западного простирания. На более южном, протяженностью порядка 100 км, расположены острова Файял и Пику (Costa, 2014; Costa et al., 2015; França et al., 2009; Quartau et al., 2015; Romer et al., 2018; Tripanera et al., 2014).

*Остров Пику* (Costa et al., 2015; Hildenbrand et al., 2008) вытянут в северо-западном направлении на 46 км. Он сложен тремя вулканическими постройками, которые развивались на протяжении среднего плейстоцена-голоцена. Наиболее древняя, вулкан Топо, расположена на юго-востоке острова. Сохранившаяся часть достигает высоты 1020 м и сложена анкарамитовыми и базальтовыми лавами с возрастом порядка 186–115 тыс. лет. Они перекрыты с несогласием лавами и продуктами трещинных извержений (70 тыс. лет), которые формировали также многочисленные небольшие шлаковые конусы (хребет Ашада). Западная половина острова сложена стратовулканом Пику, который имеет кальдеру с диаметром около 500 м и глубиной 30 м. Над ее северным краем возвышается конус Пикийо высотой 70 м. Стратовулкан начал извергаться 53 тыс. лет назад и имеет максимальную высоту 2351 м. За историческое время на острове Пику

в 1562–1564, 1718 и 1720 гг. произошли четыре извержения. Фумарольная деятельность на конусе Пикинью отмечается и в настоящее время (<https://www.destinazores.com/en/destination/pico/montanha-do-pico/>).

Вулканические сооружения о. Пику были разрушены тремя крупными оползнями. Стенка отрыва северного из них имеет протяженность порядка 55 км и расположена, в основном, в районе трещинных извержения, затрагивая также северо-восточную часть стратовулкана Пику. Напротив нее, на дне пролива Жоржи с максимальной глубиной 1270 м установлена область холмисто-блокового рельефа площадью порядка 150 км<sup>2</sup>. Крупнейшие блоки имеют протяженность в 1700 м при их высоте до 100 м. Оползневой цирк частично заполнен лавовыми потоками с возрастом 70 тыс. лет, что указывает на его формирование в более древнее время смещения северной части острова (видимо в интервале 125–70 тыс. лет). Обращает внимание, что зона отрыва этого оползня расположена на простирании разломных зон о. Файял. Второй, менее масштабный, оползень установлен на южном склоне хребта Ашада и остатках вулкана Топо. Смещенный материал расположен под водой на

расстоянии около 17 км от юго-восточного края острова. Наконец, третий оползень нарушил строение южного склона вулкана Пику (рис. 6).

*Остров Файял* (Quartau et al., 2012) расположен в 6 км к северо-западу от о. Пику. Он сложен тремя вулканическими комплексами. Наиболее древний наземный щитовой вулкан с возрастом ~850 тыс. лет расположен на северо-востоке острова. Он сложен потоками лав гавайитов, которые были перекрыты, после перерыва, лавами постройки с возрастом ~360 тыс. лет. Примерно в это же время (350–120 тыс. лет) начал формироваться грабен Файял ограниченный сбросами с простиранием 110°–120° и углами падения 60°–70°. Основная часть острова сложена лавами, пирокластическими образованиями и пемзами базальтового, бенмориитового и трахитового составов вулкана Кальдейра, который сформировался между ~120 и ~40 тыс. лет назад. С ним связана самая высокая вершина острова — г. Кабесу-Горду (1043 м). В 1998 г. на о. Файял произошло землетрясение с магнитудой 5.8 (Marques et al., 2008), которое привело к разрушениям, жертвам и образованию оползней на береговых обрывах и на внутренних стенках кальдеры Центрального вулкана. В некоторых долинах



**Рис. 6.** Конус Пикинью на краю вулканической кальдеры г. Пику. Остров Пику. Вид с юго-востока (<https://www.arrivalguides.com/en/Travelguide/Azores/doandsee/volcanic-landscape-of-pico-island-72653/>).

**Fig. 6.** Piquinho cone on the edge of the Pico volcanic caldera. Pico Island. View from the southeast (<https://www.arrivalguides.com/en/Travelguide/Azores/doandsee/volcanic-landscape-of-pico-island-72653/>).

были сформированы обломочные потоки. Наиболее молодые (<16 тыс. лет) трещинные извержения щелочных базальтов и трахибазальтов зоны Капелу на о. Файял происходили на западе острова. Здесь известны также и исторические извержения в 1672–1673 и 1957–1958 гг. В 1958 г. произошло извержение в кальдере Центрального вулкана.

*Остров Сан-Жоржи* (Hildenbrand et al., 2008; Marques et al., 2015; Viveiros, Zanon, 2018) расположен в 20 км к северо-востоку от хребта Файял-Пику. Максимальная протяженность острова составляет 53 км при ширине всего 8 км. Его наиболее высокой точкой является пик Эшперанса в центральной части острова, высота которого достигает 1053 м над уровнем моря. Остров сложен тремя вулканическими комплексами (базальтовые лавы, пирокластические образования) с возрастом от 1.9 до <0.1 млн лет. На о. Сан-Жоржи за 5600 лет произошло 12 или 13 извержений. Последние трещинные излияния лав известны в 1580 и 1808 гг. и привели к человеческим жертвам. В 1964 г. у западного окончания острова на глубине около 1000 м было зафиксировано подводное извержение. Остров Сан-Жоржи расположен в пределах активной сейсмической зоны и на нем неоднократно (1580, 1757, 1808 и 1899 гг.) происходили сильные землетрясения, наиболее разрушительное (M – 7.4) из которых произошло 9 июля 1757 г. и привело к гибели 1034 человек, тотальным разрушениям и изменениям рельефа.

Вулканические сооружения островов Грациоза, Терсейра и Сан-Мигель расположены в пределах рифта Терсейра.

*Остров Грациоза* (Hipólito et al., 2013; Lagrea et al., 2014; Sibrant et al., 2014) представляет собой среднеплейстоцен-голоценовую полигенную вулканическую постройку с максимальной высотой ~400 м. Наиболее древний комплекс о. Грациоза (1057.620±120 тыс. лет) сложен трахитовыми и базальтовыми лавами гавайитового типа, которые переслаиваются с пирокластическими образованиями. Они перекрыты вулканокластическими толщами (350–435 тыс. лет) и, в свою очередь, после перерыва, лавами и шлаками с возрастом ~110 тыс. лет и моложе. В настоящее время на острове нет признаков существенной вулканической и сейсмической активности, однако исследования показывают, что здесь 31 тыс. лет назад происходили активные движения по разломам. На о. Грациоза за последние 12 тыс. лет установлено, как минимум, 10 извержений вулканов, последнее из которых имеет возраст 2000 лет. В историческое время зафиксировано 8 землетрясений (1611, 1717, 1730, 1787, 1817, 1837, 1868, 1883 гг.), два из которых имели магнитуды >7 и некоторые из них (1730 г.) при-

вели к тотальным разрушениям и человеческим жертвам.

*Остров Терсейра* (Casalbore et al., 2015; Casas et al., 2018) расположен в пределах одноименного рифта и представляет собой вулканическое сооружение, которое начало формироваться в среднем плейстоцене (370–388 тыс. лет) и является активным до настоящего времени. Оно сложено базальтовыми и трахитовыми лавами и пирокластическими образованиями четырех вулканов центрального типа с кальдерами. Два из них на востоке острова считаются потухшими в отличие от Пику Альту, с которым связано несколько потоков игнимбритов и самый молодой и активно растущий вулкан Санта Барбара (наивысшая точка острова 1023 м). Начало формирования последнего началось 25 тыс. лет назад, а последнее извержение отмечено в 1761 г. На склонах о. Терсейра выявлены незначительные по размерам, но многочисленные оползни. Два наиболее крупных оползня (протяженность стенок отрыва до 2 км) установлены западнее острова на глубинах 100–600 м.

*Остров Сан-Мигель* (Carmo et al., 2015) расположен в юго-восточной части рифта Терсейра и вытянут вдоль его простираения. Он сложен продуктами извержений нескольких стратовулканов и трещинных систем, которые начали развиваться со среднеплейстоценового времени. Восточная часть острова сложена наиболее древними образованиями и неактивными постройками. В активной центральной части острова неоднократно происходили извержения гавайского и стромболианского типов преимущественно с излияниями лав трахитового и базальтового составов.

*Остров Санта-Мария* (Ávila et al., 2018; Marques et al., 2020; Sibrant et al., 2015), наиболее древний остров Азорского архипелага, расположен на его востоке. Он имеет выровненный рельеф в его западной половине и слабохолмистый в восточной, с максимальной высотой рельефа 590 м (Пику-Алту). Образование вулканических построек острова происходило в три основных этапа. В течение первого, 5.7–5.3 млн лет назад существовал древний щитовой вулкан. Во второй — молодой (4.3–2.8 млн лет) сложенный базальтовыми потоками и дайками. В течение третьего были образованы несколько шлаковых конусов с возрастом 3.6–2.8 млн лет. На острове Санта-Мария (Ávila et al., 2018; Marques et al., 2020; Sibrant et al., 2015) разрушение древнего вулканического сооружения оползнями происходило 5.3–4.3 и 3.6 млн лет назад. Их стенки отрывов проявлены уступами, как в рельефе острова, так и его подводной части на юге, востоке и западе острова.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Вулканические островные сооружения опасны не только излияниями лав, выбросами пеплов и газов, но и их разрушением масштабными обвально-оползновыми процессами. Установлено, что они могут протекать очень быстро и вызывать катастрофические цунами. Приведем только два примера из недавней истории.

Остров Риттер (Ward, Day, 2003) расположен севернее Австралии в пределах островной дуги Новогвинейского моря. Он образовался 13 марта 1888 г. в результате быстрого разрушения крупной постройки конической формы, высотой порядка 750 м над уровнем моря и около 2000 м над дном прилегающей глубоководной котловины. Оползень вызвал цунами высотой до 20 м, влияние которого отмечали на расстоянии до 600 км. Разрушению постройки не предшествовали активные вулканические и сейсмические события. В последующем, в течение года, произошло возникновение нового активного вулканического конуса в оползневом цирке.

Вулкан Анак Кракатау (Karstens et al., 2020; Ye et al., 2020) расположен в Зондском проливе. Он начал формироваться в 1929 г. внутри кальдеры вулкана Кракатау, возникшей в 1883 г. В 2018 г. его высота достигла 300 м. 22 декабря 2018 г. произошло катастрофическое оползание его юго-западного склона, в результате которого возникло цунами, которое привело к гибели более 400 человек.

Разрушения вулканических сооружений в результате оползней известны на 400-х четвертичных вулканах, а с 1600 г., как минимум, на 17-ти (Karstens et al., 2020). Показательным примером может быть оползание склона вулкана Сент-Хеленес (США) в 1980 г. с последующим извержением (Glicken, 1996).

Архипелаги вулканических островов северо-восточной Атлантики были сформированы на океанической коре, главным образом, в миоцен-четвертичное время. Их образование происходило в течении многих фаз эффузивной деятельности (до десяти и более), внедрения даек и интрузий, которые разделялись периодами покоя.

Идеальный стратовулкан по своей геометрии приближен к конусу, который имеет центр тяжести, отстоящий от его основания на расстояние  $1/4$  высоты. Его смещение вверх по оси или в сторону неизбежно приведет к неустойчивости всей фигуры. Вулканические постройки идеальной формы встречаются редко. Обычно они имеют более сложное строение, чем простая геометрическая фигура. На ее неустойчивость могут влиять крутизна склонов, чередование лавовых потоков, туфов и отложений пирокластических

потоков, неравномерное изменение пород гидротермальными процессами, сейсмичность, и другие факторы, но, чаще, их сочетание. Высота постройки не имеет решающего значения. Внедрение магмы в краевые части вулканического сооружения приводят к смещению его центра тяжести и могут привести к асимметрии и неустойчивости склонов постройки. Такие же последствия могут быть при оползании части вулкана и под действием гравитационных сил. В связи с вышесказанным, выявление вулканических построек с асимметричным строением или иными отклонениями от идеальной геометрической фигуры могут быть признаком опасности сооружения.

Проведенный анализ вулканических построек архипелагов островов северо-восточной Атлантики позволяет сделать вывод, что многие из них в ходе своей эволюции были разрушены в разное время катастрофическими оползновыми процессами, вызывавшими цунами. На некоторых из них, в оползневых цирках, возникали новые вулканические аппараты. Эти явления установлены на островах Санту-Антан, Фогу, Сан-Висенти, Пику, Гомера и ряда других.

В юго-западной части архипелага Островов Зеленого Мыса оползневые явления разного возраста происходили на островах Санту-Антан, Сан-Висенти, Сан-Николау и Фогу. На восточном краю оползневой кальдеры о. Фогу возвышается конус Пику де Фогу. Он имеет высоту над дном абиссальной котловины порядка 6000 м и крутые склоны. Последний, а также о. Брера и подводная гора Кадамашту находятся в области повышенной сейсмической активности, зафиксированной Геофизической сетью Кабо Верде (Faria, Fonseca, 2014). Приведенные выше данные позволяют отнести этот регион к потенциально опасному для возникновения крупных оползней.

Канарский архипелаг в настоящий момент имеет повышенную вулканическую и сейсмическую активность по сравнению с Островами Зеленого Мыса. Здесь, за 500 лет произошло 15 извержений вулканов на островах Тенерифе, Иерро, Пальма, а также Лансароте. Основная сейсмичность архипелага и его акватории сосредоточена на островах Тенерифе, Пальма и Иерро. Южнее последнего в 2011–2012 гг. произошло формирование нового подводного вулкана. Активная гидротермальная деятельность отмечена и западнее острова. «Облако» многочисленных, но маломagnitudeных сейсмических событий расположено между островами Тенерифе и Гран Канария, где выявлен растущий подводный вулкан Ихо де Тенерифе.

Повышенная сейсмичность островов Пальма и Иерро позволила ряду авторов (Gee et al., 2001; Masson et al., 2008) сделать предположение

о возможности разрушения этих построек крупными оползнями, которые могут вызвать масштабные цунами даже на востоке Северной Америки. Это вполне правдоподобный сценарий т.к. цунамигенные отложения установлены (Pérez-Torrado et al., 2006) на о-вах Гран Канария, Тенерифе и Лансароте. Они находятся на высотах 40–190 м и на удалении до 800 м от береговой линии.

Азорский архипелаг находится в стадии активного формирования и это обстоятельство позволяет относить его, в целом, к региону с повышенной вулканической и оползневой опасностями. Необходимо отметить, что сейсмическая активность на всем архипелаге за последние годы возрастает. На этом фоне наибольшую опасность представляют вулканические постройки, расположенные в пределах рифта Терсейра, а также о. Пику. В настоящий момент вулкан Пику активно разрушается обвалами и оползнями, что может быть признаком потенциального катастрофического разрушения всей вулканической постройки.

Автор благодарен д.г.м.н С.Ю. Соколову и к.г.н. Н.Н. Турко за прочтение статьи и конструктивные замечания.

Лабораторная тема: «Геологические опасности в Мировом океане и их связь с рельефом, геодинамическими и тектоническими процессами». Государственная регистрация № 0135-2019-0076.

#### Список литературы [References]

- Тектоника и магматизм островов Зеленого Мыса. М.: Наука, 1990. С. 223–230 [Tectonic and magmatism of Cape Verde Islands. M.: Nauka, 1990. 246 p.].
- Acosta J., Uchupi E., Muñoz A. et al.* Geologic evolution of the Canarian Islands of Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria and La Gomera and comparison of landslides at these islands with those at Tenerife, La Palma and El Hierro // *Marine Geophysical Researches*. 2004. V. 24. № 1. P. 1–40. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4352-X\\_1](https://doi.org/10.1007/1-4020-4352-X_1)
- Ancochea E., Huertas M.J., Hernán F. et al.* Volcanic evolution of São Vicente, Cape Verde Islands: The Praia Grande landslide // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2010. V. 198. P. 143–157.
- Ávila S.P., Ramalho R.S., Habermann J.M. et al.* The Marine Fossil Record at Santa Maria Island (Azores). Volcanoes of the Azores, Active Volcanoes of the World. U. Ed.: Kueppers U., Beier C. Springer-Verlag GmbH. 2018, P. 155–196 [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32226-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32226-6_9)
- Azevedo J.M.M., Portugal Ferreira M.R.* The volcanotectonic evolution of Flores Island, Azores (Portugal) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006. V. 156. Iss. 1–2. P. 90–102.
- Brum Da Silveira A., Prada S., Ramalho R. et al.* Inventariação do Património Geológico da Ilha da Madeira. Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais-Relatório Final, 2012. 414 p. <https://geodiversidade.madeira.gov.pt>
- Carmo R., Madeira J., Ferreira T. et al.* Volcano-tectonic structures of São Miguel Island, Azores In.: Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago). Gaspar J.L., Guest J.E., Duncan A.M., Barriga F.J.A.S., Chester D. K. (eds). Geological Society, London. Memoirs. 2015. V. 44. P. 65–86 <http://doi.org/10.1144/M44.6>
- Carracedo J.C., Badiola E.R. Soler V.* The 1730–1736 eruption of Lanzarote, Canary Islands: a long, high-magnitude basaltic fissure eruption // *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 1992. V. 53. Iss. 1–4. P. 239–250.
- Carracedo J.C., Troll V.R., Zaczek K.* The 2011–2012 submarine eruption off El Hierro, Canary Islands: New lessons in oceanic island growth and volcanic crisis management // *Earth-Science Reviews*. 2015. V. 150. P. 168–200.
- Carvalho A., Sousa M.L., Oliveira C.S. et al.* Seismic hazard for the Central Group of the Azores Islands // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2001. V. 42. № 1–2. P. 89–105.
- Casalbore D., Romagnoli C., Pimentel A. et al.* Volcanic, tectonic and mass-wasting processes offshore Terceira Island (Azores) revealed by high-resolution seafloor mapping // *Bulletin of Volcanology*. 2015. V. 77. № 3. P. 23–42. <http://doi.org/10.1007/s00445-015-0905-3>
- Casas D., Pimentel A., Pacheco J. et al.* Serreta 1998–2001 submarine volcanic eruption, offshore Terceira (Azores): Characterization of the vent and inferences about the eruptive dynamics // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2018. V. 356. P. 127–140.
- Casillas R., Fernández C., Colmenero J. R. et al.* Deformation structures associated with the Tazo landslide (La Gomera, Canary Islands) // *Bulletin of Volcanology*. 2010. V. 72. № 8. P. 945–960. <http://doi.org/10.1007/s00445-010-0373-8>
- Coca J., Ohde T., Redondo A. et al.* Remote sensing of the El Hierro submarine volcanic eruption plume // *International Journal of Remote Sensing*. 2014. V. 35. № 17, P. 6573–6598. <http://doi.org/10.1080/01431161.2014.960613>
- Costa A.C.G.* Mass-wasting episodes in the geological evolution of the Azores islands: timing, recurrence, mechanisms and consequences. Thèse de Doctorat. Sciences de L’univers. Université Paris-Sud. 2014. 308 p.
- Costa A.C.G., Hildenbrand A., Marques F.O. et al.* Catastrophic flank collapses and slumping in Pico Island during the last 130 kyr (Pico-Faial ridge, Azores Triple Junction) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 302. P. 33–46.
- Criado C., Paris R.* Volcanic landscape and geomorphological evolution of Tenerife islands. Field trip guide–A2 // 6th International Conference on Geomorphology: Geomorphology in Regions of Environmental Contrasts, September 7–11, 2005. Zaragoza, Spain. 30 p.
- Faria B., Fonseca J.F.B.D.* Investigating volcanic hazard in Cape Verde Islands through geophysical monitoring: network description and first results // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2014. V. 14. P. 485–499. <http://doi.org/10.5194/nhess-14-485-2014>

- Fonseca P.E., Madeira J.E., Prada S.N. et al.* Madeira Island preliminary geological data and satellite imagery analysis. In: EUROCK2002. Workshop on Volcanic Rocks. 2002. Sociedade Portuguesa de Geotecnica, Editors: C. Dinis da Gama, L. Ribeiro e Sousa. P. 97–104.
- França Z., Lago M., Nunes J.C. et al.* Geochemistry of alkaline basalts of Corvo Island (Azores, Portugal): preliminary data // *Geogaceta*. 2006. № 40. P. 87–90.
- França Z., Forjaz V., Tilling R. et al.* Volcanic history of Pico and Faial islands, Azores. An overview. Governo dos Açores, Secretaria Regional da Ciência, Tecnologia e Equipamentos. 2009. 270 p.
- Funck T., Schmincke H.-U.* Growth and destruction of Gran Canaria deduced from seismic reflection and bathymetric data // *Journal of Geophysical Research*. 1998. V. 103. № B7. P. 15393–15407.
- Gee M.J.R., Watts A.B., Masson D.G. et al.* Landslides and the evolution of El Hierro in the Canary Islands // *Marine Geology*. 2001. V. 177. P. 271–293.
- Glicken H.* Helens volcano, Washington // U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey Open File Report 96–677. 1996. 98 p.
- Hildenbrand A., Madureira P., Marques F.O. et al.* Multi-stage evolution of a sub-aerial volcanic ridge over the last 1.3 Myr: S. Jorge Island, Azores Triple Junction // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. V. 273. P. 289–298.
- Hildenbrand A., Marques F.O., Catalão J.* Large-scale mass wasting on small volcanic islands revealed by the study of Flores Island (Azores) // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. P. 13898. <http://doi.org/10.1038/s41598-018-32253-0>
- Hildner E.* Magma storage and ascent of historic and prehistoric eruptions of Fogo, Cape Verde Islands: A barometric, petrologic and geochemical approach. Dissertation for the doctorate degree of the Department of Geosciences at the University of Bremen. 2011. Bremen. 132 p.
- Hipólito A., Madeira J., Carmo R. et al.* Neotectonics of Graciosa island (Azores): a contribution to seismic hazard assessment of a volcanic area in a complex geodynamic setting // *Annals of Geophysics*. 2013. V. 56. № 6. 18 p. <http://doi.org/10.4401/ag-6222-S0677>
- Hunt J.E., Wynn R.B., Masson D.G. et al.* Sedimentological and geochemical evidence for multistage failure of volcanic island landslides: A case study from Icod landslide on north Tenerife, Canary Islands // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2011. V. 12. P. 1–36. <http://doi.org/10.1029/2011GC003740>
- Hunt J.E., Wynn R.B., Talling P.J. et al.* Multistage collapse of eight western Canary Island landslides in the last 1.5 Ma: Sedimentological and geochemical evidence from subunits in submarine flow deposits // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013. V. 14. № 7. P. 2159–2181. <http://doi.org/10.1002/ggge.20138>
- Hunt J.E., Talling P.J., Clare M.A. et al.* Long-term (17 Ma) turbidite record of the timing and frequency of large flank collapses of the Canary Islands // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2014. V. 15. № 8. P. 3322–3345. <http://doi.org/10.1002/2014GC005232>
- Karstens J., Kelfoun K., Watt S.F.L. et al.* Combining 3D seismics, eyewitness accounts and numerical simulations to reconstruct the 1888 Ritter Island sector collapse and tsunami // *International Journal of Earth Sciences*. 2020. V. 109, № 8. P. 2659–2677. <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01854-4>
- Klügel A., Walter T.R., Schwarz S. et al.* Gravitational spreading causes en-echelon diking along a rift zone of Madeira Archipelago: an experimental approach and implications for magma transport // *Bulletin of Volcanology*. 2005. V. 68. Iss. 1. P. 37–46. <https://doi.org/10.1007/s00445-005-0418-6>
- Krastel S., Schmincke H.-U., Jacobs C. et al.* Submarine landslides around the Canary Islands // *Journal of Geophysical Research*. 2001. V. 106. № B3. P. 3977–3997.
- Krastel S., Schmincke H.-U.* The channel between Gran Canaria and Tenerife: constructive processes and destructive events during the evolution of volcanic islands // *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*. 2002. V. 91. № 4. P. 629–641. <https://doi.org/10.1007/s00531-002-0285-8>
- Larrea P., Galé C., Ubide T. et al.* Magmatic Evolution of Graciosa (Azores, Portugal) // *Journal of Petrology*. 2014. V. 55. № 11. P. 2125–2154. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu052>
- Le Bas T.P., Masson D.G., Holtom R.T. et al.* Slope Failures of the Flanks of the Southern Cape Verde Islands. Submarine Mass Movements and Their Consequences / Ed.: Lykousis V., Sakellariou D., Locat J. 2007. Springer Netherlands, P. 337–345. [http://doi.org/10.1007/978-1-4020-6512-5\\_35](http://doi.org/10.1007/978-1-4020-6512-5_35)
- Llanes P., Herrera R., Gómez M. et al.* Geological evolution of the volcanic island La Gomera, Canary Islands, from analysis of its geomorphology // *Marine Geology*. 2009. V. 264. № 3–4. P. 123–139. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.05.001>
- Madeira J., Ramalho R., Hipólito A. et al.* Urban risk from tsunami hazard at volcanic oceanic islands: examples from Macaronesia // *International Conference on Urban Risks*. Lisbon. 2016. P. 1–8.
- Marinoni L.B., Pasquare G.* Tectonic evolution of the emergent part of a volcanic ocean island: Lanzarote, CanIslands // *Tectonophysics*. 1994. V. 239. № 1–4. P. 111–137.
- Marques R., Amaral P., Araújo I. et al.* Landslides on São Miguel Island (Azores): susceptibility analysis and validation of rupture zones using a bivariate GIS-based statistical approach. *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Chapter 13. Geological Society London Memoirs. 2015. V. 44. № 1. P. 167–184. Eds.: Gaspar J.L., Guest J.E., Duncan A.M., Barriga F.J.A.S., Chester D.K. <https://doi.org/10.1144/M44.13>
- Marques F., Hildenbrand A., Costa A. et al.* The evolution of Santa Maria Island in the context of the Azores Triple Junction // *Bulletin of Volcanology*. 2020. V. 82. № 6. 62 p. <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01378-4>. hal-03004925
- Márquez P.L.* The Magmatic Evolution of Graciosa and Corvo oceanic islands, Azores archipelago. PhD Thesis Universidad De Zaragoza. Departamento De Ciencias De La Tierra. Grupo De Investigación Geotransfer. 2014. 209 p.
- Masson D.G., Le Bas T.P., Grevemeyer I. et al.* Flank collapse and large-scale landsliding in the Cape Verde Islands, off West Africa // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. V. 9. № 7. P. 1–16. <https://doi.org/10.1029/2008GC001983>

- Mitchell-Thome R.C.* Geology of the middle Atlantic Islands. Berlin, Stuttgart: Gebrüder Bornträger, 1976. 382 p.
- Münn S., Walter T.R., Klügel A.* Gravitational spreading controls rift zones and flank instability on El Hierro, Canary Islands // *Geological Magazine*. 2006. V. 143. Iss. 3. P. 257–268. <https://doi.org/10.1017/S0016756806002019>
- Pérez N.M., Somoza L., Hernández P.A. et al.* Evidence from acoustic imaging for submarine volcanic activity in 2012 off the west coast of El Hierro (Canary Islands, Spain) // *Bulletin of Volcanology*. 2014. V. 76. № 12. P. 882–896. <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0882-y>
- Pérez-Torrado F.J., Paris R., Cabrera M.C. et al.* Tsunami deposits related to flank collapse in oceanic volcanoes: The Agaete Valley evidence, Gran Canaria, Canary Islands // *Marine Geology*. 2006. V. 227. Iss. 1–2. P. 135–149.
- Romer R.H.W., Beier C., Haase K.M. et al.* Correlated Changes Between Volcanic Structures and Magma Composition in the Faial Volcanic System, Azores // *Frontiers in Earth Science*. 2018. V. 6. № 78. 23 p. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00078>
- Quartau R., Tempera F., Mitchell N.C. et al.* Morphology of the Faial Island shelf (Azores): The interplay between volcanic, erosional, depositional, tectonic and masswasting processes // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2012. V. 13. № 4. P. 1–30. <https://doi.org/10.1029/2011GC003987>
- Quartau R., Madeira J., Mitchell N.C. et al.* The insular shelves of the Faial-Pico Ridge (Azores archipelago): A morphological record of its Evolution // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2015. V. 16. Iss. 5. P. 1401–1420. <https://doi.org/10.1002/2015GC005733>
- Quartau R., Ramalho R.S., Madeira J. et al.* Gravitational, erosional and depositional processes on volcanic ocean islands: Insights from the submarine morphology of Madeira Archipelago // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. V. 482. P. 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.11.003>
- Richter N., Favalli M., Dalfsen E. et al.* Lava flow hazard at Fogo Volcano, Cabo Verde, before and after the 2014–2015 eruption // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016. V. 16, № 8. P. 1925–1951. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1925-2016>
- Ribeiro M.L., Ramalho M.M.* A Geological tour of the Archipelago of Madeira. Direcção Regional do Comércio, Indústria e Energia. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I. P. 2010. 92 p.
- Santos R., Quartau R., Brum da Silveira A. et al.* Gravitational, erosional, sedimentary and volcanic processes on the submarine environment of Selvagens Islands (Madeira Archipelago, Portugal) // *Marine Geology*. 2019. V. 415. P. 288–299.
- Sibrant A.L.R., Marques F.O., Hildenbrand A.* Construction and destruction of a volcanic island developed inside an oceanic rift: Graciosa Island, Terceira Rift, Azores // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2014. V. 284. P. 32–45.
- Sibrant A.L.R., Hildenbrand A., Marques F.O. et al.* Volcano–tectonic evolution of the Santa Maria Island (Azores): Implications for paleostress evolution at the western Eurasia-Nubia plate boundary // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 291. P. 49–62.
- Schmidt R., Schmincke H.-U.* From seamount to oceanic island, Porto Santo, central East-Atlantic // *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*. 2002. V. 91. P. 594–614. <https://doi.org/10.1007/s00531-001-0243-x>
- Schmincke H.-U., Graf G.* DECOS / OMEX II, Cruise No. 43, 25 November 1998–14 January 1999. METEOR–Berichte, Universität Hamburg, 00–2. 2000. 99 p.
- Schwarz S.* Magmatic and volcanological evolution of the Desertas rift zone (Madeira archipelago, NE Atlantic). Dissertation for the doctorate degree of the Department Geosciences at the University of Bremen. Bremen, 2004. 106 p.
- Steiner C., Hobson A., Favre P. et al.* Mesozoic sequence of Fuerteventura (Canary Islands): witness of Early Jurassic sea-floor spreading in the central Atlantic // *GSA Bulletin*. 1998. V. 110. № 10. P. 1304–1317.
- Stillman C.J.* Giant Miocene landslides and the evolution of Fuerteventura, Canary Islands // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1999. V. 94. Iss. 1–4. P. 89–104.
- Trippanera D., Porreca M., Ruch J. et al.* Relationships between tectonics and magmatism in a transtensive transform setting: An example from Faial Island (Azores, Portugal) // *GSA Bulletin*. 2014. V. 126. №. 1/2, P. 164–181. <https://doi.org/10.1130/B30758.1>
- Tsiogalos S.M.* Eruptive dynamics and petrological evolution of recent volcanism on the El Hierro Island. Implications for volcanic hazard assessment. Thesis Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Geodynamic and Geophysics. Faculty of Geology. Universidad de Barcelona. Barcelona. 2017. 200 p.
- Vázquez J.T., Palomino D., Sánchez-Guillamón O. et al.* Geomorphological characteristics of the Passage of Lanzarote (East Canary Islands Region) // *Resúmenessobreeel VIII Simposio MIA15, Málaga del 21 al 23 de Septiembre de 2015*. 2015. P. 575–578. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1699.3766>
- Viveiros F., Zanon V.* Revisiting the subaerial AD 1580 and AD 1808 volcanic eruptions at São Jorge Island (Azores archipelago, Portugal) // 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4–13 April, 2018 in Vienna, Austria. 2018, P. 9945.
- Ward S.N., Day S.* Ritter Island Volcano-lateral collapse and the tsunami of 1888 // *Geophysical Journal International*. 2003. V. 154. Iss. 3. P. 891–902.
- Ye L., Kanamori H., Rivera L. et al.* The 22 December 2018 tsunami from flank collapse of Anak Krakatau volcano during eruption // *Science Advances*. 2020. V. 6. № 3. P. 1–9.
- Zitellini N., Mendes L.A., Cordoba D. et al.* Source of 1755 Lisbon Earthquake and Tsunami Investigated // *Eos, Transactions, American Geophysical Union*. 2001, V. 82. № 26. Iss. 26, P. 285. P. 290–291.

**LANDSLIDE PROCESSES ON VOLCANIC EDIFICES  
IN THE NORTH-EASTERN PART OF THE ATLANTIC OCEAN**

**A.O. Mazarovich**

*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 119017*

Received February 16, 2022; revised March 15, 2022; accepted March 27, 2022

In the northeastern Atlantic there are (from south to north) archipelagoes of the volcanic islands of Cape Verde, Canary, Selvagens, Madeira and Azores. They were formed on the oceanic crust in Miocene-Quaternary times. Analysis of the geological structure of the thirty islands leads to the conclusion that half of them were destroyed at different times in the course of their evolution by catastrophic landslide processes. On some of these islands such events have occurred more than once. They caused tsunamis and formed large landslide masses in the adjacent parts of the ocean. Based on the data presented, the assumption is made of volcanic edifices that may have been destroyed by landslide processes. A prerequisite for landslides on a volcanic edifice could be a shift of its center of gravity.

*Keywords: Cape Verde Islands, Canaries, Azores, volcanic edifice, landslide.*