

---

<https://doi.org/10.15407/gpimo2020.02.081>

**Л.Е. Собисевич**, доктор техн. наук, главный научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1  
E-mail: sobis@ifz.ru  
ORCID 0000-0001-7496-0985

## **ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА КИЛАУЭА. СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ГРАВИТОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, ЗАФИКСИРОВАННЫЕ НА ЭТАПЕ АКТИВИЗАЦИИ ВУЛКАНА**

---

*Выполнен анализ развивающегося извержения щитового вулкана Килауэа, которое существенно повлияло на природную среду архипелага Гавайи. Основное внимание в статье сосредоточено на сейсмогравитационных процессах, обусловленных трансформацией масштабных отдельностей горной породы в структурах Гавайского плюма, сформировавшего архипелаг. Активизация сейсмогравитационных процессов в районе вулканической постройки способствовала развитию очаговых образований и, как следствие, породила возмущения в вариациях магнитного поля Земли.*

*Сейсмогравитационный процесс и гравитомагнитные возмущения были успешно зафиксированы аппаратурными комплексами Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН на этапе подготовки сильного землетрясения, очаг которого сформировался в вулканической постройке Килауэа.*

*Экспериментально установлено, что перед землетрясением в недрах вулканической постройки извергающегося вулкана Килауэа начали формироваться отдельные масштабные геологические структуры, ответственные за развитие сейсмогравитационных процессов и гравитомагнитных возмущений, предварявших главный удар. Зафиксированные аппаратурно прогностические эффекты проявились здесь за несколько часов до главного удара.*

*Анализ экспериментальных данных, полученных аппаратурными комплексами Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН и приведенного в печати представительного научного материала, отражающего геодинамические процессы в районе вулканической постройки вулкана Килауэа, позволяет сделать обоснованные выводы о том, что изучение выделенного отдельного класса сейсмогравитационных процессов сегодня становится определяющей проблемой геофизики, вулканологии и геоэкологии.*

*Наблюдаемые процессы и возмущения могут быть классифицированы как краткосрочные предвестники развивающейся экологической катастрофы в районе архипелага Гавайи.*

**Ключевые слова:** вулкан Килауэа, извержение, гравитомагнитные возмущения, сейсмогравитационные процессы.

---

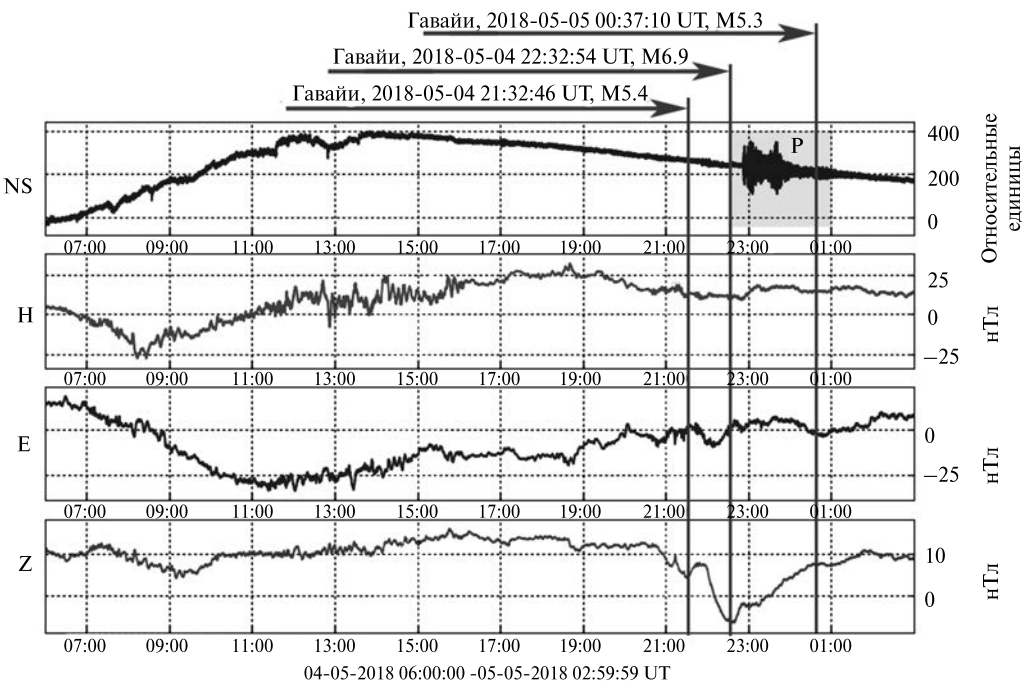
Цитування: Собисевич Л.Е. Извержение вулкана Килауэа. Сейсмогравитационные процессы и гравитомагнитные возмущения, зафиксированные на этапе активизации вулкана. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2020. 16, № 2: 81—91. <https://doi.org/10.15407/gpimo2020.02.081>

В отличие от вулканов центрального типа щитовые вулканы отличаются характером извержения. К числу таких вулканов следует отнести один из самых активных в мире вулканов, вулкан Килауэа, который резко активизировался на Гавайях в начале мая 2018 года. Извержение сопровождается здесь подземными толчками и появлениями разломов в земной коре главного острова Гавайев. Потоки лавы сметают постройки и автомобили на своем пути, а люди вынуждены срочно эвакуироваться на неопределенное время. Как показала съемка с борта беспилотного летательного аппарата, дно кратера вулкана по мере извержения постепенно трансформируется и проседает.

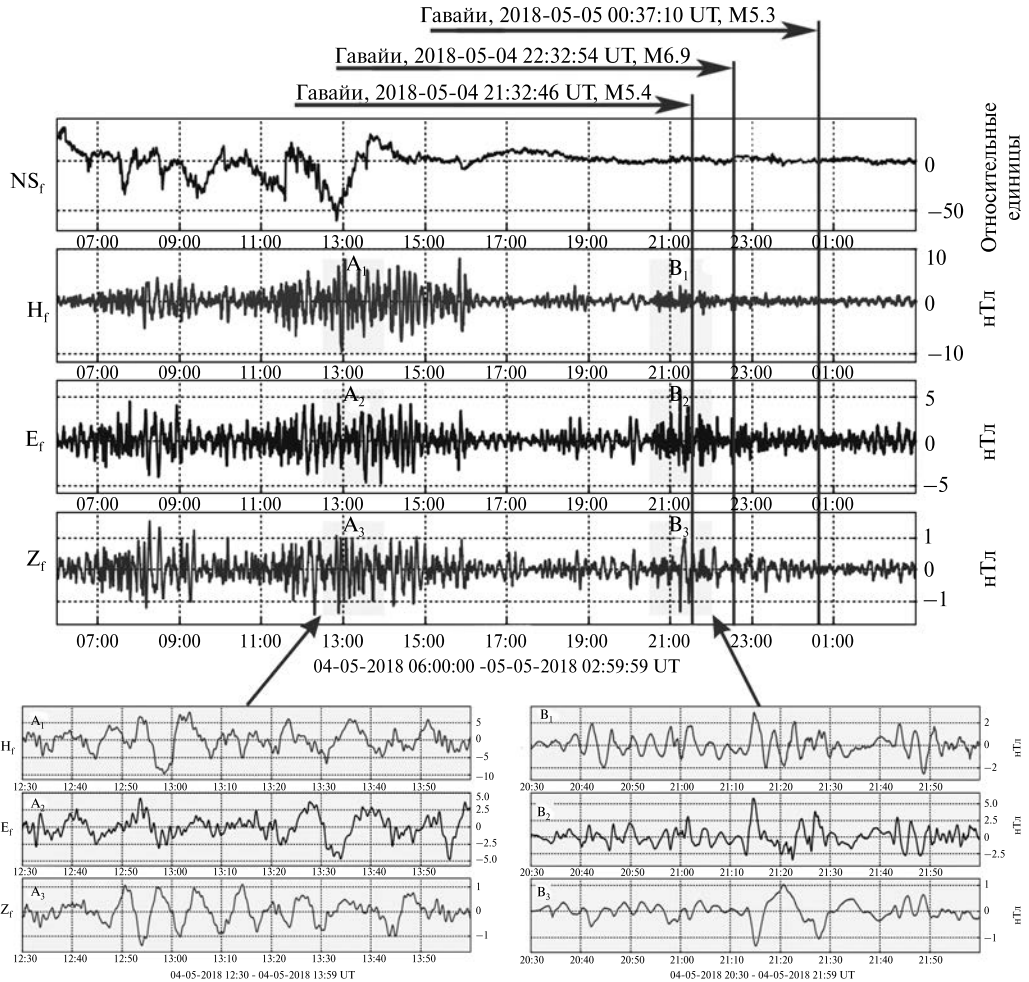
Вулкан Килауэа, который считают одним из самых агрессивных действующих вулканов на Земле, непрерывно извергается вот уже более 30 лет подряд, причиняя постоянный экологический вред флоре и фауне островов архипелага Гавайи.

Килауэа, в переводе с гавайского — “изрыгающий, выплёскивающийся или сильно растекающийся” — активный щитовой вулкан. Расположен он на склоне более высокого вулкана Мауна-Лоа. Однако Килауэа — это отдельный вулкан, так как он имеет самостоятельную магматическую камеру. Высота Килауэа — 1247 м над уровнем моря, а его основание упирается в дно Тихого океана, поэтому относительная высота вулканической постройки составляет около 6800 м. Структурно — это “щитовой вулкан с кальдерой”. Длина кальдеры — 4 км, ширина — 3,2 км, глубина у западного края — 120 м.

Жители Большого острова Гавайев были заранее предупреждены о необходимости поиска убежища, так как в небольшом юго-восточном районе, где во время двухнедельного извержения из земли начала выплескиваться лава, увели-



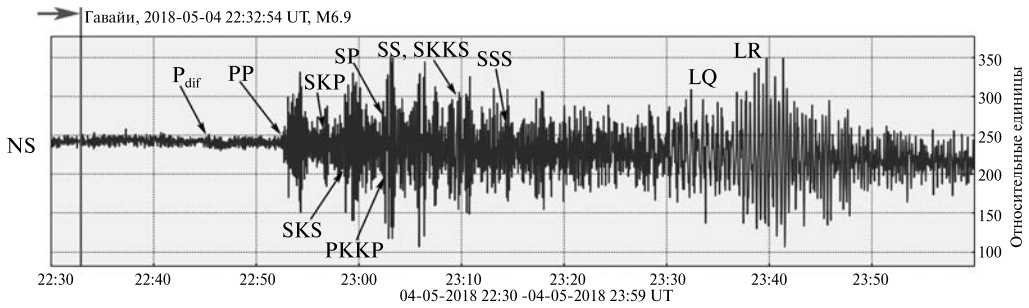
**Рис. 1.** Показания информационно-измерительных систем Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН, зафиксировавших землетрясения на Гавайи 04.05.2018: NS — показания наклономерной станции, ориентированной в азимут “север-юг”; Н, Е и Z — вариации компонент магнитного поля Земли



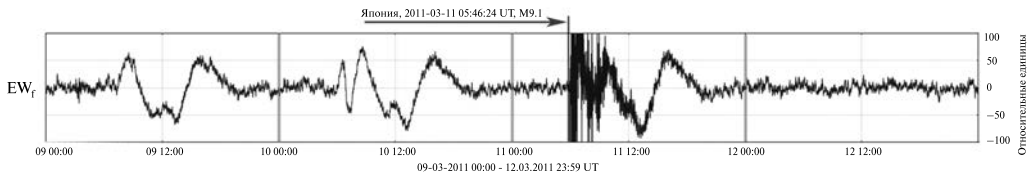
**Рис. 2.** Показания информационно-измерительных систем Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН, зафиксировавших землетрясения на Гавайи 04.05.2018. Они отчетливо отражают сейсмогравитационный процесс и гравитомагнитные возмущения, предвещающие анализируемое землетрясение.  $NS_r$  — показания наклономера Северокавказской геофизической обсерватории ориентированного по азимуту “север-юг”, отражающие сейсмогравитационный процесс. Данные профильтрованы в диапазоне 0,04—10 мГц.  $H_r$ ,  $E_r$  и  $Z_r$  — аномальные пульсации-предвестники, отражающие тонкую структуру гравитомагнитных возмущений в вариациях магнитного поля Земли (вариации компонент магнитного поля Земли  $H$ ,  $E$  и  $Z$  профильтрованные в диапазоне 1—300 мГц)

чивался уровень токсичного газа. По наблюдениям вулканологов интенсивность выбросов пепла непрерывно изменялась, а потоки лавы активно уничтожали окружающую среду. По мере развития извержения нарастает опасность экологической катастрофы.

В ночь на 5 мая в районе вулканической постройки Килауэа отмечено землетрясение, магнитуда которого составила величину  $M = 6,9$ . Это самое сильное землетрясение, зафиксированное на архипелаге Гавайи в инструментальный период наблюдений за вулканической и сейсмической активностью. Отметим, что в период с 3-го по 5-е мая сейсмическая обстановка в районе архипелага обеспе-



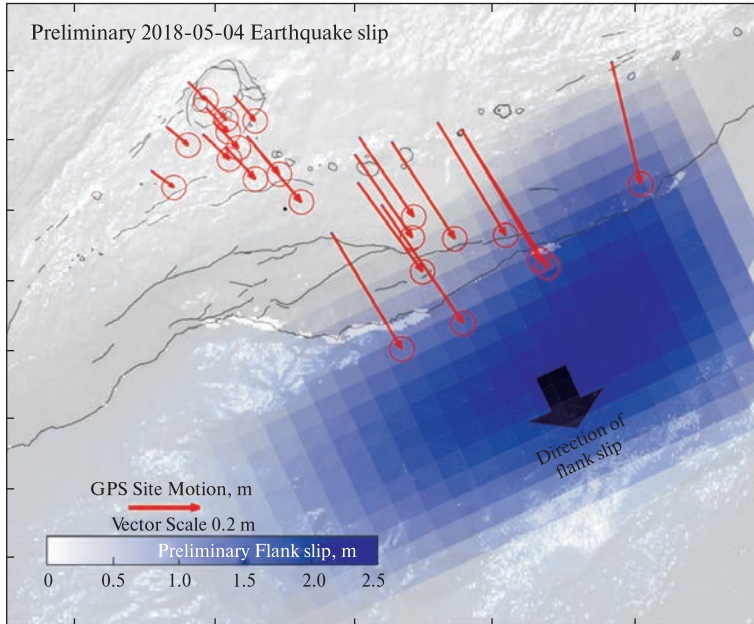
**Рис. 3.** Показания накломера (NS) Северокавказской геофизической обсерватории, выставленного в азимут “север-юг”. Расстояние от очага до Северокавказской обсерватории ИФЗ РАН примерно  $115^\circ$  позволяют проследить развитие сейсмогравитационного процесса анализируемого землетрясения на Гавайи 04.05.2018.  $P_{\text{диф}}$  — дифрагированная волна P от очага, которая отразившись от земного ядра, появляется на поверхности Земли на эпицентральной расстоянии около  $103^\circ$ .  $P_{\text{диф}}$  приходит в точку приема приблизительно на 4 мин опережая более сильную волну PP. В пределах диапазона расстояний  $103^\circ - 143^\circ$  P-волны проходят земное ядро. При этом скорость P-волн на границе мантия-ядро равна 13,7 км/с, ниже границы 8,0 км/с. Длиннопериодные P- и S-волны дифрагируют на границе ядро-мантия и могут наблюдаться в случае сильных землетрясений как  $P_{\text{диф}}$  ( $S_{\text{диф}}$ ) до расстояний  $150^\circ$ . Волны P (S), идущие от очага, потерпевшие одно отражение от свободной поверхности, обозначены как PP(SS). Волны P (S), идущие от очага вниз, потерпевшие два отражения от свободной поверхности, обозначены как PPP (SSS). SP — однократно отраженная волна от свободной поверхности, претерпевшая обмен при отражении S и вступившая на станцию как P, а PKKP — волны прошедшие внешнее ядро. Поверхностные волны: LQ — волна Лява, LR — волна Релея



**Рис. 4.** Сейсмогравитационный процесс, выделенный в показаниях накломерной станции Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН [1] в период подготовки и на этапе развития Великого восточного японского землетрясения 2011 г.

чила успешную фиксацию сейсмических процессов, развивающихся в недрах вулканической постройки Килауэа. Были выделены сейсмогравитационный процесс и сопутствующие гравитоманнитные возмущения. Результаты, отражающие показания информационно-измерительных систем Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН, зафиксировавших землетрясения на Гавайях 04.05.2018 г., приведены на рис. 1—3. Все необходимые пояснения даны в подрисуночных подписях.

Характеризуя полученные обсерваторские данные, отметим, что это первый случай в истории инструментальных наблюдений за извержениями вулканов, когда удалось выделить сейсмогравитационный процесс и сопутствующие гравитоманнитные возмущения, которые предшествовали главному удару, обусловленному разрушением сформировавшейся очаговой области в районе вулканической постройки.



**Рис. 5.** Поверхностные подвижки, отражающие масштабы сейсмодетонационных процессов в районе расположения вулкана (по опубликованным данным спутника Sentinel-1A Европейского космического агентства, охватывающего период времени с 23 апреля по 5 мая 2018 года)

Отметим, что отчетливый сейсмогравитационный процесс, протекавший в районе основной постройки вулкана Килауэа, начал развиваться в 06.00 UT и окончился в интервале между 16.00—18.00 UT. Продолжавшийся в течение около 10 часов, он может быть охарактеризован как низкочастотный “квазигармонический” колебательный процесс. За 5—6 часов перед главным ударом сейсмогравитационная обстановка в структурах вулканической постройки стабилизировалась. При этом зафиксированный сейсмогравитационный процесс сопровождался отчетливыми наведенными гравитомагнитными возмущениями, амплитуда которых изменялась в пределах 2,0—8,0 нТл.

Сопоставляя приведенные инструментальные данные с результатами, которые были зафиксированы обсерваторскими комплексами Северокавказской геофизической обсерватории на этапе подготовки и в процессе развития крупных землетрясений, следует отметить, что вулканические землетрясения имеют характерные отличия. В числе основных отличий следует выделить в первую очередь период наблюдаемого сейсмогравитационного процесса. Для катастрофических землетрясений в сейсмоопасных районах Земли он составляет величину порядка 5—6 часов. Пример такого сейсмогравитационного процесса, зафиксированного нами на этапе развития Великого восточного японского землетрясения 2011 г., представлен на рис. 4.

По-видимому, эти отличия обусловлены в основном условиями формирования и масштабами гравитирующих отдельностей горной породы в структурах вулканической постройки вулкана Килауэа. Чтобы убедиться в этом, обратимся к результатам GPS-наблюдений, отражающих смещение южного склона вулкана Килауэа (рис. 5).

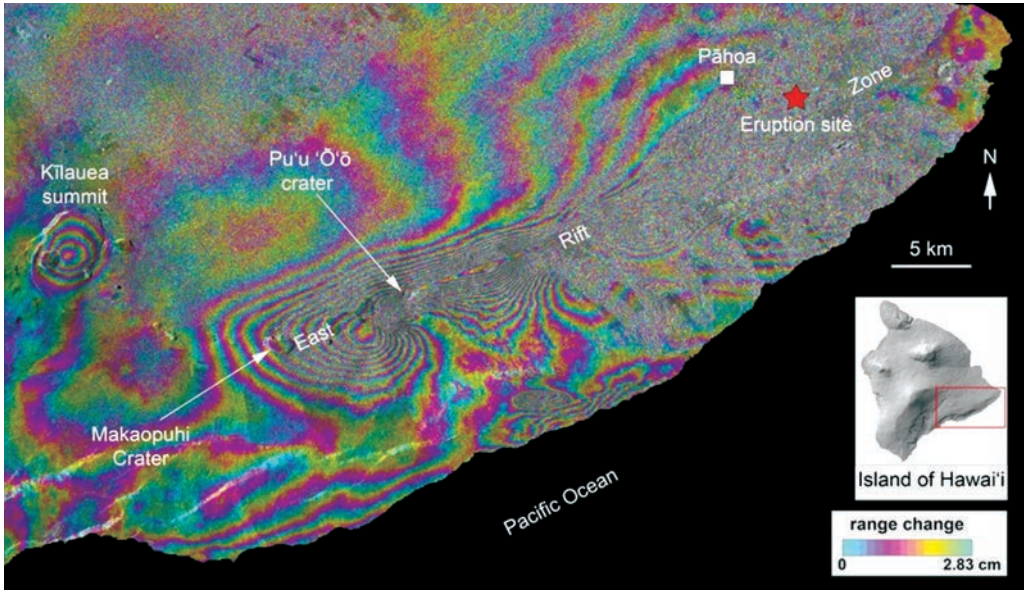


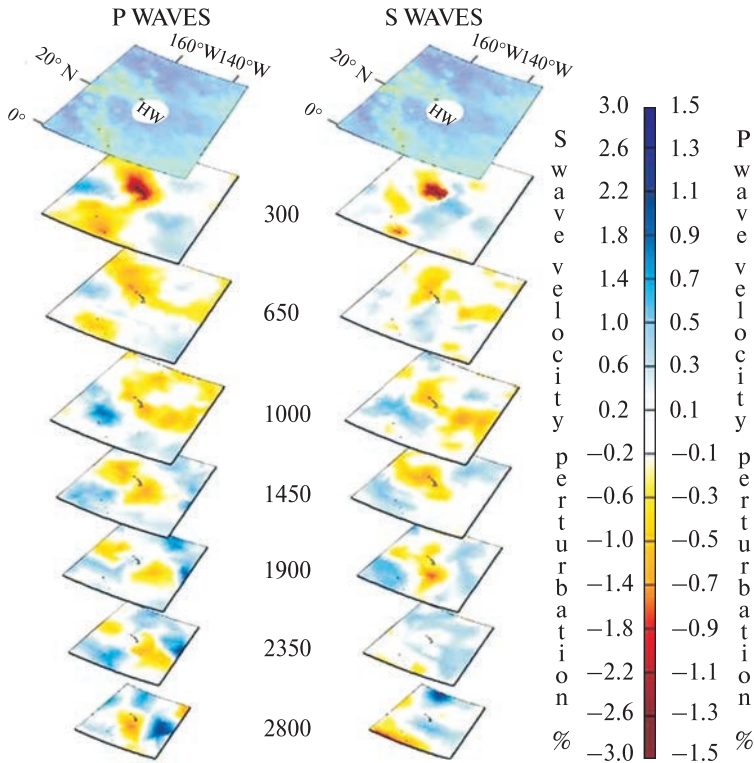
Рис. 6. Интерферограмма поверхностных деформаций (по данным спутника Sentinel-1A Европейского космического агентства, охватывающего период времени с 23 апреля по 5 мая 2018 года, на 6:15 утра по восточному времени)

Землетрясение с  $M = 6,9$ , связанное с динамическими перестройками в районе вулкана Килауэа, привело по данным непрерывных GPS наблюдений к подвижкам примерно на 0,5 м по южному берегу. Здесь отмечается смещение до 2,5 м, которое может быть связано с проскальзыванием по разлому под южным склоном вулкана, на границе между вулканической постройкой и дном океана на глубинах 7—9 км.

На рис. 6 приведены результаты компьютерного моделирования разлома. Здесь цветом выделены смещения земной поверхности. Приведенные данные помогают лучше понять, как происходит движение по разлому во время вулканического процесса, который усиливается землетрясением, и оценить масштаб подвижки. Интерферограмма на рис. 6 представляет карту поверхностных деформаций, построенную по данным спутника Sentinel-1A Европейского космического агентства. Карта охватывает период времени с 23 апреля по 5 мая 2018 года, на 6:15 утра по восточному времени.

Цветами отражены смещения поверхности. Картина на вершине Килауэа дает представление об оседании и дефляции (“сдувании”). Вдоль Восточной рифтовой зоны интерферограмма отражает разгрузку магмы. Это место соответствует текущему извержению (звездочка). Смещения на южном склоне Килауэа, вероятнее всего, обусловлены деформацией, связанной с землетрясением 4 мая ( $M = 6,9$ ). Однако следов землетрясения зафиксировано здесь не так много, поскольку из-за угла обзора спутника интерферограмма в основном отражает вертикальные деформации и деформации в азимуте восток — запад.

Сегодня катастрофические процессы в районе вулкана продолжают. Растет количество трещин, из которых изливается лава. Ухудшается экологическая обстановка в регионе.



**Рис. 7.** Трехмерный вид мантийного плюма под горячей точкой в районе Гавайи (HW) по данным томографии на Р-волнах (слева) и S-волнах (справа). Размеры горизонтальных сечений  $40^\circ$  на  $40^\circ$ . Положение сечений выбрано так, чтобы в их центральной части располагались выделенные структуры плюма. Пропорции вертикальной шкалы здесь преувеличены, чтобы избежать наложения изображений

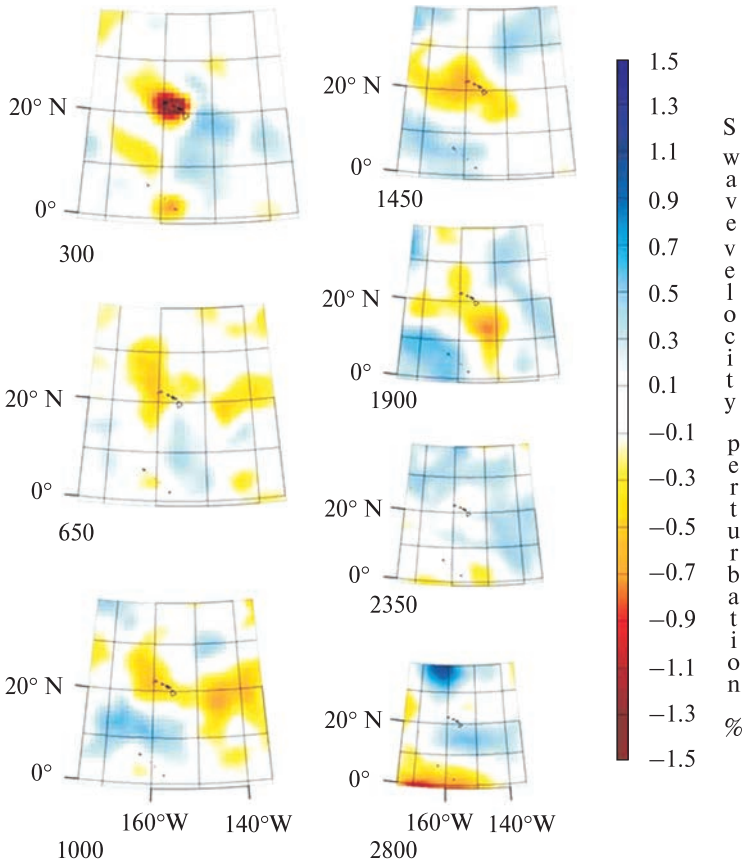
Характеризуя проблему в целом, отметим, что Гавайский архипелаг — это структура вулканического происхождения. Он прямой свидетель дрейфа Тихоокеанской плиты над горячей мантийной точкой (плюмом). Именно этот дрейф Тихоокеанской плиты в течение последних 70 миллионов лет стал основной причиной возникновения 6000-километровой Гавайско-Императорской цепи подводных гор.

Старейшим вулканом на Гавайях считается вулкан Кохала, чей возраст превышает миллион лет. А самый молодой здесь вулкан Килауэа. Его возраст исчисляется значением от 300000 до 600000 лет. Подводный вулкан Лоихи, расположенный на склоне острова Гавайи, моложе настолько, что его вершина пока не достигла океанической поверхности.

Гавайская горячая точка — стационарная мантийная горячая точка (плюм), сохраняющая свое положение практически в течение всего кайнозойского периода.

В районе Гавайского архипелага существуют и другие вулканы. Отметим некоторые из них.

Вулкан Килауэа — самый активный щитовой вулкан на Земле. Вулкан расположен вдоль южного берега острова. Координаты вулкана Килауэа:  $19^\circ 25' 16''$  N;  $155^\circ 17' 13''$  W. Кальдера расположена на высоте 1247 м.



**Рис. 8.** Горизонтальные сечения мантийного плюма по данным томографии на S-волнах под горячей точкой архипелага Гавайи (HW)

Вулкан Мауна-Лоа — один из пяти вулканов, которые формируют Гавайи в Тихом океане. Это один из самых крупных, щитовых вулканов в мире. Координаты вулкана Мауна-Лоа:  $19,475^{\circ}$  N,  $155,608^{\circ}$  W. Высота над уровнем моря 4,170 м.

Подводный вулкан Лоихи относят к активным подводным вулканам, расположенном на дне Тихого океана, южнее вулкана Килауэа, на расстоянии около 35 км от острова Гавайи. Именно этот вулкан располагается над центром плюма.

Несмотря на значительные успехи в развитии современных методов мониторинга глубинного строения вулканов, изучение мантийных плюмов до сих пор остается в числе крупных фундаментальных научных проблем геофизики [2].

Используя методы сейсмической томографии [4] группе ученых удалось впервые осуществить глобальную томографию всего земного шара, используя данные о временах вступлений P- и S-волн от большого числа (более 70 000) сейсмических событий. Эти уникальные научные результаты, пока не имеют аналогов в мировой литературе.

Выдержки из этого фундаментального исследования, отражающие глубинную структуру геологической среды под Гавайскими вулканами, приведены на рис. 7 и рис. 8.



Характеризуя полученные научные результаты, отметим следующее. На глубинном уровне 1000 км структура плюма отражается характерными скоростными отдельностями, которые простираются в юго-восточном направлении. На глубине 1450 км обращает на себя внимание интенсивная низкоскоростная аномалия, которая разворачивается к северо-западу от Гавайских островов.

В процессе расшифровки авторы использовали различные -S и -P моды.

До глубины 1450 км результаты использования мод -S и -P находятся в согласии между собой. На более глубоких уровнях (начиная с 1450 км) на моде -S не наблюдается расщепление плюма на два изолированных канала, которые отчетливо видны на моде -P. Один канал прослеживается до глубины около 1900 км, где он исчезает на моде -S, в то время как на моде -P этот канал достигает границы ядро-мантия.

Как и следовало ожидать, исследования глобального масштаба имеют слабое пространственное разрешение. Восстанавливаемый размер неоднородности в горизонтальной плоскости порядка  $\sim 1000 \text{ км}^2$ . И хотя полученные научные результаты пока не позволяют с достаточной точностью проследить процессы трансформации отдельных геологических образований в недрах гавайского архипелага, использование объемных и поверхностных сейсмических волн в задачах мониторинга глубинного строения литосферы под Гавайями вполне оправдано.

Первая успешная попытка обойти отмеченные трудности была предпринята в эксперименте (PLUME), который осуществили американские ученые.

В рамках проведенного уникального морского эксперимента было установлено более 70 сейсмических станций на дне Тихого океана [3]. В результате успешного функционирования развернутого на дне океана геоакустического антенного комплекса было записано более 350 телесеизмических землетрясений.

Эти данные стали основой инновационной сейсмической технологии, которая позволила определять скорости поверхностных волн вдоль трасс между донными длиннопериодными сейсмическими станциями. Полученные научные результаты сегодня трудно переоценить.

Заканчивая краткий анализ современных подходов, применяемых при зондировании мантийных плюмов, отметим, что развиваемые в этой части технологии глубинного мониторинга уже позволили выйти на решение отдельного класса фундаментальных задач геофизики слоистых сред [5].

Таким образом, проведенные сейсмические наблюдения донными сейсмостанциями и расшифрованные результаты сейсмографических экспериментов позволяют сделать определенные выводы по поводу устройства Гавайского плюма.

Активизация извержения вулкана Килауэа на Гавайях заявила о формировании экологической вулканической катастрофы в масштабах всего архипелага. Вулканологи отмечают, что уровень лавового озера внутри вулкана понижается из-за нисходящего движения расплавленных пород. В этом случае могут возникнуть условия для формирования большого парового взрыва, когда магма опустится до мест, где залегают грунтовые воды. Это может вызвать экологическую катастрофу. Кроме того, не исключена вероятность того, что Килауэа спровоцирует извержения других крупных вулканов, которые находятся на Гавайях.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Собісевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Северокавказская геофизическая обсерватория. Создание, анализ результатов наблюдений. Москва: ИФЗ РАН, 2013. 512 с.
2. Koulakov I., Shapiro N. Seismic Tomography of Volcanoes. Encyclopedia of Earthquake Engineering. 2015. P. 1–18
3. Laske G., Markee A., Orcutt J.A., Wolfe C.J., Collins J.A., Solomon S.C., Detrick R.S., Bercovici D., Hauri E.H. Asymmetric shallow mantle structure beneath the Hawaiian Swell-evidence from Rayleigh waves recorded by the PLUME network. *Geophysical Journal International*. 2011. Vol. 187. P. 1725–1742.
4. Montelli R., Nolet G., Dahlen F.A., and Masters G. A catalogue of deep mantle plumes: New results from finitefrequency tomography. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2006. No. 7. Q11007, doi:10.1029/2006GC001248]
5. Rychert C.A., Laske G., Harmon N., Shearer P.M. Seismic imaging of melt in a displaced Hawaiian plume. *Nature Geoscience*. 2013. Vol. 6. P. 657–660.

Статья поступила 15.02.2020

Л.Е. Собісевич, доктор техн. наук, головний науковий співробітник  
Федеральна державна бюджетна установа науки Інститут фізики Землі  
ім. О.Ю. Шмідта РАН  
123242, Москва, вул. Велика Грузинська, 10, буд. 1  
E-mail: sobis@ifz.ru  
ORCID 0000-0001-7496-0985

### ВИВЕРЖЕННЯ ВУЛКАНУ КІЛАУЕА. СЕЙСМОГРАВІТАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ І ГРАВІТОМАГНІТНІ ЗБУРЕННЯ, ЗАФІКСОВАНІ НА ЕТАПІ АКТИВІЗАЦІЇ ВУЛКАНУ

Виконано аналіз виверження, яке розвивається, щитового вулкану Кілауеа, що суттєво вплинуло на природне середовище архіпелагу Гаваї. Основна увага в доповіді зосереджена на сейсмогравітаційних процесах, обумовлених трансформацією масштабних окремоостей гірської породи в структурах Гавайського плюму, що сформував архіпелаг. Активізація сейсмогравітаційних процесів в районі вулканічної споруди сприяла розвитку вогнищевих утворень і, як наслідок, породила збурення у варіаціях магнітного поля Землі.

Сейсмогравітаційний процес і гравітомагнітні збурення були успішно зафіксовані апаратними комплексами Північнокавказької геофізичної обсерваторії ІФЗ РАН на етапі підготовки сильного землетрусу, епіцентр якого сформувався у вулканічній споруді Кілауеа.

Експериментально встановлено, що перед землетрусом в надрах вулканічної споруди вулкану Кілауеа почали формуватися окремі масштабні геологічні структури, відповідальні за розвиток сейсмогравітаційних процесів і гравітомагнітних збурень, що передували головному удару. Зафіксовані апаратно прогностичні ефекти проявились тут за кілька годин до головного удару.

Аналіз експериментальних даних, отриманих апаратними комплексами Північнокавказької геофізичної обсерваторії ІФЗ РАН і наведеного в друці представницького наукового матеріалу відображає геодинамічні процеси в районі вулканічної споруди вулкана Кілауеа, дозволяє зробити обґрунтовані висновки про те, що вивчення окремого виділеного класу сейсмогравітаційних процесів сьогодні стає визначальною проблемою геофізики, вулканології і геоєкології.

Спостережувані процеси і збурення можуть бути класифіковані як короткострокові провісники екологічної катастрофи, що розвивається в районі архіпелагу Гаваї.

**Ключові слова:** вулкан Кілауеа, виверження, гравітомагнітні збурення, сейсмогравітаційні процеси.

*L.E. Sobisevich*, Dr. Sci. (Techn.), Principal Scientific Researcher  
Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow  
10, build. 1, Bolshaya Gruzinskaya str., Moscow, Russia, 123242  
E-mail: sobis@ifz.ru  
ORCID 0000-0001-7496-0985

ERUPTION OF THE VOLCANO KILAUEA.  
SEISMIC-GRAVITY PROCESSES AND GRAVITOMAGNETIC DISTURBANCES,  
FIXED AT THE VOLCANO ACTIVATION STAGE

An analysis is made of the developing eruption of the shield Kilauea volcano, which significantly influenced the natural environment of the Hawaiian archipelago. The main attention in the article is focused on seismic gravity processes caused by the transformation of large-scale rock formations in the structures of the Hawaiian plume that formed the archipelago. The intensification of seismic gravity processes in the area of volcanic construction contributed to the development of focal formations and, as a result, gave rise to disturbances in variations of the Earth's magnetic field. The seismic gravity process and gravitomagnetic disturbances were successfully recorded by the hardware complexes of the North Caucasus Geophysical Observatory of the IPE RAS at the stage of preparing a strong earthquake, the source of which was formed in the Kilauea volcanic structure.

It was experimentally found that before the earthquake in the bowels of the volcanic structure of the erupting Kilauea volcano, separate large-scale geological structures began to form, responsible for the development of seismic gravity processes and gravitomagnetic disturbances, which preceded the main shock. The recorded instrumental prognostic effects appeared here several hours before the main blow.

An analysis of the experimental data obtained by the hardware complexes of the North Caucasus Geophysical Observatory of the IPE RAS and the published representative scientific material reflecting the geodynamic processes in the area of the Kilauea volcanic structure allows us to make reasonable conclusions that the study of a separate class of seismic gravity processes today becomes a determining problem in geophysics, volcanology and geoecology.

Observed processes and disturbances can be classified as short-term harbingers of a developing environmental disaster in the Hawaii archipelago.

**Keywords:** *Kilauea volcano, eruption, gravitomagnetic disturbances, seismic gravity processes.*