

ЭПИЗОДЫ ОБРУШЕНИЯ СКЛОНОВ СЕВЕРНОГО СЕГМЕНТА ИМПЕРАТОРСКИХ ГОР И ФОРМИРОВАНИЕ ПОДВОДНЫХ ОПОЛЗНЕЙ

© Б.В. Баранов, Н.В. Цуканов, К.А. Дозорова

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

Поступила в редакцию 25.07.2026; после доработки 16.09.2026; принята в печать 25.09.2026

Обрушение склонов и формирование подводных оползней на северном сегменте Императорских гор, являющихся частью Гавайско-Императорского хребта, изучалось с использованием батиметрических и сейсмических данных. Эти данные были получены в рейсе SO201-1a на научно-исследовательском судне «Зонне», проведенном в рамках российско-германского проекта КАЛЬМАР. Их анализ позволил выделить в рельефе и осадочном чехле подводные оползни и горизонты оползневых отложений, которые были образованы за счет четырех эпизодов обрушения склона. Два эпизода могли быть обусловлены активным ростом вулканов, когда их постройки не стабильны, а сейсмическая активность является наиболее высокой. Первый произошел, когда постройки формировались над Гавайской горячей точкой. Второй эпизод, вероятно, связан с повторной активизацией вулканизма из-за изменения направления движения плиты Кула в эоцене. Обрушение склона во время третьего и четвертого эпизодов было вызвано формированием нестабильных объемов осадочного материала. Этот материал выносился из Берингова моря, формируя дрейф Мейджи, и его объемы увеличивались по мере приближения Императорских гор к Алеутской островной дуге.

Ключевые слова: Тихий океан, Императорские горы, оползневые структуры и отложения.

ВВЕДЕНИЕ

Гавайско-Императорский хребет протягивается на расстояние около 6000 км от о. Гавайи на юге до сочленения Курило-Камчатского желоба с Алеутским желобом на севере. Он является одним из крупнейших структурных элементов Тихого океана и разделяет его на северо-восточную и юго-западную части. Хребет состоит из собственно Гавайского хребта и Императорских гор¹ (рис. 1, врезка). Первый простирается в северо-западном направлении и его вершины возвышаются над поверхностью моря, формируя цепочку островов протяженностью 2500 км. Цепь Императорских гор ориентирована в субмеридиональном направлении и полностью находится под водой.

Гавайско-Императорский хребет сформировался при прохождении Тихоокеанской плиты

над мантийным плюмом (Morgan, 1972; Wilson, 1963). Эта структура является объектом многолетних исследований (Keller et al., 2000, Kerr et al., 2005; Moore, Clague, 1992; Watts et al., 1985, Watts et al., 2021, 2025a) и представляет собой природную лабораторию по изучению всех аспектов геологических, геодинамических и геохимических процессов взаимодействия мантийного плюма с океанской литосферой. Данное определение относится, в основном, к Гавайскому хребту, где был выполнен основной объем исследований, в то же время геолого-геофизические особенности Императорских гор оставались слабо изученными. Эта ситуация стала постепенно изменяться, как свидетельствует ряд геолого-геофизических исследований, которые были выполнены здесь в последнее время и перечислены в тексте настоящей работы.

На Императорских горах в 2009 г. в экспедиции на научно-исследовательском судне (НИС) «Зонне» SO201-1a были получены сейсмические, батиметрические, магнитные и грави-

¹англ. Emperor Seamount Chain; русск. Императорские горы (Агапова и др., 1992)

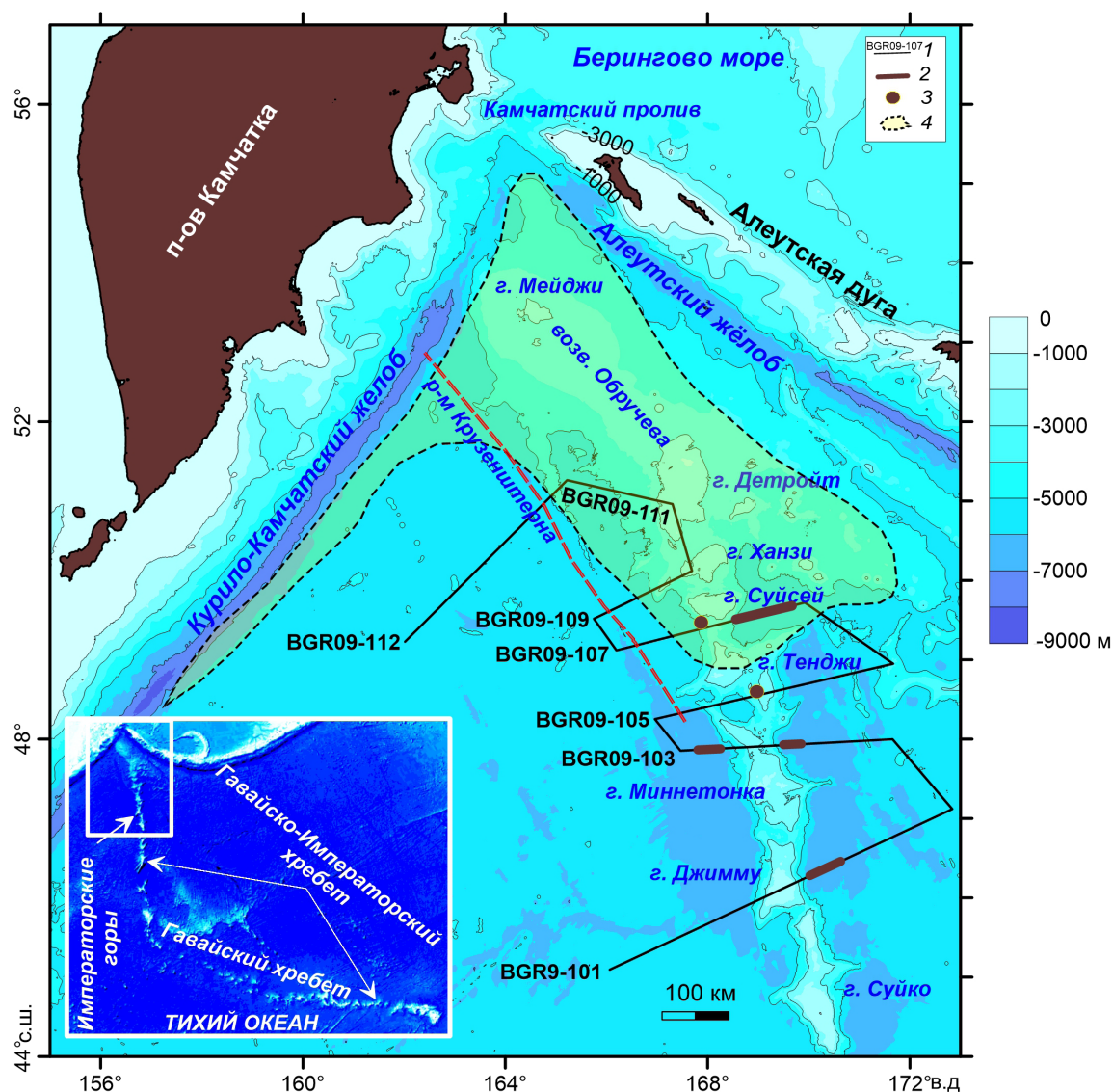


Рис. 1. Батиметрическая карта района исследований на северном окончании Императорских гор (гид ГЕВСО) с положением сейсмических профилей и подводных оползней. Сечение изобат, начиная с глубины 1000 м равно 2000 м. На врезке показано генеральное положение района работ. 1 — профили сейсмической съемки и их номера, 2 — перемещенный материал, 3 — подводные оползни, 4 — дрейф Мейджи по (Scholl et al., 1977).

Fig. 1. Bathymetry map of the study area on the northern Emperor Seamounts Chain (GEBCO grid) with locations of seismic profiles and submarine landslides. Contour lines interval is 2000 m starting with 1000 m depth. General location of the study area is shown in the inset. 1 — numbered seismic survey profiles, 2 — mass transport deposits (MTD), 3 — submarine landslides, 4 — Meiji Drift after (Scholl et al., 1977).

метрические данные вдоль нескольких пересечений северного сегмента этой структуры (Cruise Report..., 2009). Анализ этих данных позволил выявить активизацию древнего (мелового) разлома Крузенштерна, обусловленную его погружением в Курило-Камчатскую зону субдукции (Freitag et al., 2011). По данным, полученным в рейсе параметрическим эхолотом, было выполнено описание строения верхней части осадочного чехла этого района с выделением различных типов осадков (Цуканов и др., 2019). Также было установлено, что подвиг возвышенности Обручева, являющейся

северным окончанием Императорских гор, приводит к сегментации островодужного склона Курило-Камчатского желоба, которая влияет на размеры очагов сильнейших землетрясений (Баранов и др., 2022).

В 2018 г. в рейсе НИС «Зонне» SO264 на Императорских горах с 20° с. ш. по 50° с. ш. на 50-ти станциях были отобраны пробы осадков (Nürnberg, 2018). Изучение их геохимии и размерности позволило установить источники сноса и высказать предположения об особенностях гидродинамических процессов в этом районе (Chen et al., 2021).

Гравиметрические, магнитные и батиметрические данные, а также данные о строении земной коры, полученные с использованием донных сейсмографов, вдоль северного сегмента Императорских гор были получены на НИС «Маркус Дж. Лангсет» (рейс MGL1902 в 2019 г.) по профилю протяженностью 400 км (Watts et al., 2021). Эти данные показали наличие региональных вариаций в строении и мощности океанической коры и выявили погребенные зоны разломов, которые пересекают Императорские горы. Они также использовались для определения эффективной упругой мощности T_e , являющейся показателем долговременной прочности литосферы и выяснения причин резкого изменения ее значений на изгибе Гавайско-Императорского хребта (Watts et al., 2025b).

В отчете по рейсу НИС «Зонне» SO201-1a (Cruise Report..., 2009) и в работах (Цуканов и др., 2019; Watts et al., 2021) отмечалось наличие подводных оползней на склонах северного сегмента Императорских гор, но их более детального изучения не проводилось. В настоящей работе авторы постарались заполнить данный пробел. В результате изучения, анализа и интерпретации полученного материала по рельефу и строению осадочного чехла был обнаружен ряд подводных оползней, определены их характерные особенности, морфологические вариации и взаимоотношения с процессами, которые создали и модифицируют систему разновозрастных частей Гавайско-Императорского хребта.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований приурочен к северному сегменту Императорских гор, протягиваясь от г. Джимму до г. Детройт (рис. 1). Данные бурения на подводных горах Суйко, Детройт и Мейджи показали, что их возраст увеличивается с юга на север и равен 61, 76, ≥ 81 млн лет, соответственно, маркируя время прохождения Тихоокеанской плиты над Гавайским мантийным плюмом (Duncan et al., 2006). Геохимические данные по базальтам этих гор дают основание предполагать, что они формировались на относительно тонкой и молодой океанической коре (Huang et al., 2005; Keller et al., 2000).

В пределах исследованного района наименьшая глубина 1245 м была измерена на вершине подводной горы Джимму (Cruise Report..., 2009). самой южной из гор района исследований, воздымающейся на высоту более 4500 м над окружающим морским дном. Подводные горы, расположенные севернее, являются не такими высокими (до 3500 м), их вершины находятся на глубине около 2500 м. Цепочка гор в целом

ориентирована в ССЗ-ЮЮВ направлении. Их западные склоны имеют углы наклона от 4° до 6° , тогда как восточные являются более крутыми с углами наклона 6° – 8° и до 20° (Cruise Report..., 2009).

Самые глубокие участки дна ниже изобаты 6000 м расположены вблизи подножья Императорских гор и соответствуют депрессиям, которые протягиваются вдоль подводных гор и хорошо видны там, где их пересекают профили BGR09-101, BGR09-103 и BGR09-105 (рис. 1). Севернее депрессии исчезают что, вероятно, связано с заполнением их осадочным материалом в результате перемещения этого участка Тихоокеанской плиты ближе к источникам сноса, формирующим дрейф Мейджи (Kerr et al., 2005). Образование этих депрессий, также как и депрессий, расположенных вдоль Гавайского хребта, обусловлено литостатическим прогибом океанической литосферы вследствие избыточного веса подводных гор (Watts et al., 1985).

На вершинах и склонах этой части Императорских гор осадки отсутствуют или их мощность не превышает 300 м (Watts et al., 2021). Более мощный осадочный слой (до 0.8 с или ~ 1200 м) присутствует в депрессиях, которые разделяют подводные горы Джимму — Миннетонка и горы Детройт — Ханзи (Watts et al., 2021). Мощность осадочного чехла на плите мелового возраста, которая погружается в зону субдукции южнее Императорских гор, составляет 300–500 м (Селиверстов, 2009). На поднятии Обручева и, особенно, на его северо-восточном склоне мощность осадочного чехла существенно увеличивается, местами достигая 1.5–2 км (Селиверстов, 2009). Увеличение мощности обусловлено наличием крупного осадочного тела — дрейфа Мейджи (Scholl et al., 1977), который, имея ширину до 300 км, вытянут в юго-восточном направлении на расстояние в 800 км (рис. 1). Дрейф Мейджи начал формироваться в олигоцене и, в основном, сложен терригенными глинами, выносимыми через Камчатский пролив из Берингова моря (Kerr et al., 2005).

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Батиметрические данные были получены многолучевым эхолотом SIMRAD EM120 (изготовитель фирма Kongsberg Maritime), установленным на судне (Cruise Report..., 2009). Многолучевой эхолот SIMRAD EM120 работает на частоте 12 кГц, 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. Базовое разрешение эхолота находится между 100 м и 200 м.

При сейсмических исследованиях применялась система пневматических источников, состоящая из двух рядов пушек с общим объемом, равным 50.8 л. Запись отраженных волн проводилась при помощи цифровой косы SERCEL на 276 каналах, длина косы была равна 3450 м, использовалась сейсмостанция SEAL. Глубина проникновения достигала 14 с удвоенного времени пробега сигнала. Самая верхняя часть осадочного чехла изучалась с использованием судового параметрического профилографа системы PARASOUND P70 (Atlas Hydrographic, Бремен), работающего на частоте 4 кГц. Глубина проникновения в осадки достигала 266 мс (≈ 200 м) (Cruise Report..., 2009).

Методика выделения подводных оползней/оползневых отложений базируется на батиметрических и/или сейсмических данных (McAdoo et al., 2000; Scarselli, 2020). Это обусловлено тем, что оползни формируют характерные формы рельефа (оползневые цирки с головными и боковыми стенками отрыва), а оползневые отложения в разрезе представлены горизонтами низкоамплитудных (акустически прозрачных) и/или хаотических сейсмофаций (Posamentier, Martinsen, 2011). Эти сейсмофации соответствуют обломочным отложениям подводных оползней и в англоязычной литературе обозначаются термином «mass transport deposits» (MTD), а в настоящей работе они названы как «отложения перемещенного материала» (ОПМ). Если подводные оползни хорошо выражены в рельефе, то можно предполагать их молодой возраст, наличие горизонтов ОПМ в осадочном разрезе дает возможность выделить отдельные эпизоды обрушения склона и формирования подводных оползней.

По результатам сейсмических исследований проведенных в рейсе НИС «Зонне» SO201-1a, в верхней части земной коры исследованного района было выделено три комплекса (Cruise Report..., 2009). Первый комплекс — это «акустический фундамент», на котором залегает второй комплекс, представленный осадками ранней стадии эволюции подводных гор и сложенный, вероятно, туфами и продуктами их эрозии. Третий комплекс образован осадками, которые накапливались в пелагических условиях.

Отложения перемещенного материала на сейсмических разрезах, полученных в рейсе SO201-1a НИС «Зонне», располагаются в третьем пелагическом комплексе осадочного чехла, который имеет хорошую стратификацию с четкими, параллельными отражающими горизонтами. В отличие от сейсмического облика пелагического комплекса горизонты ОПМ характеризу-

ются акустически прозрачными и/или хаотическими сейсмофациями (рис. 2). Эти фации могут составлять большую часть разреза мощностью до 0.8 с (~ 1.2 км) (рис 2б).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ сейсмических и батиметрических данных, полученных в рейсе SO201-1a НИС «Зонне», позволил выделить на сейсмических разрезах и в рельефе отложения перемещенного материала и подводные оползни (рис. 1).

Отложения перемещенного материала. На трех сейсмических разрезах, пересекающих Императорские горы, выделяется от одного до трех горизонтов ОПМ (рис. 3). Все они находятся в третьем осадочном комплексе, мощность которого увеличивается с юга на север в прогибах к востоку и западу от гор. В разрезе третьего комплекса горизонты ОПМ находятся в его нижней части, залегаая на втором комплексе туфогенных отложений, в средней и в верхней частях разреза. Верхний горизонт по имеющимся данным,

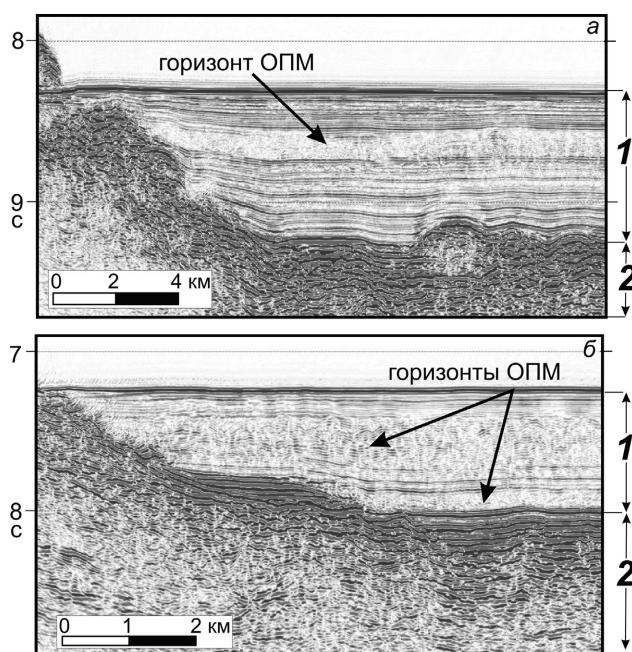


Рис. 2. Фрагменты сейсмических разрезов с горизонтами ОПМ, представленными хаотической и акустически прозрачной фациями. 1 — пелагический комплекс; 2 — туфогенный комплекс. Здесь и далее на сейсмических разрезах вертикальная шкала дана в секундах удвоенного времени пробега сигнала. Положение фрагментов разрезов показано на рис. 3.

Fig. 2. Fragments of seismic sections with MTD horizons represented by chaotic and acoustically transparent facies. 1 — pelagic complex, 2 — tuffogenic complex. Henceforward on seismic sections vertical scale show two-way travel time in seconds. Location of sections fragments is shown on Fig. 3.

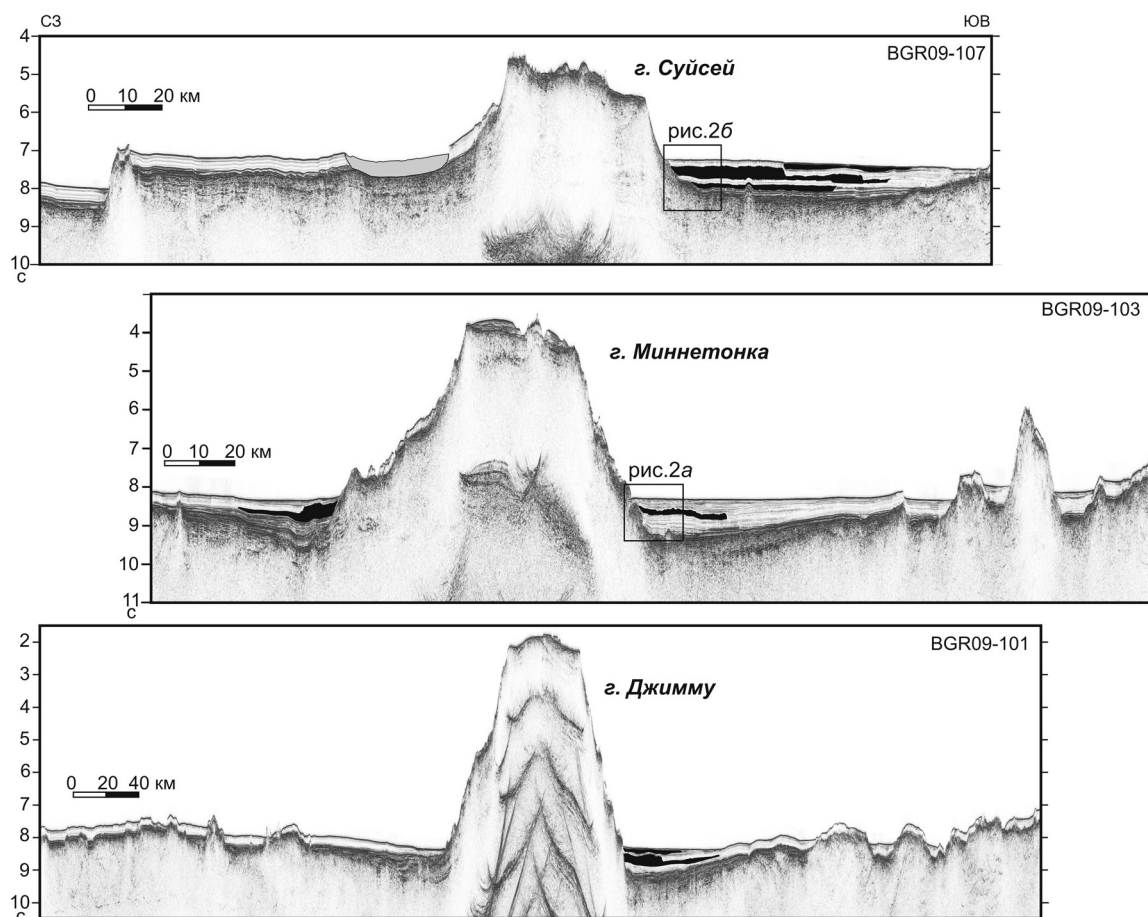


Рис. 3. Сейсмические разрезы, на которых черной заливкой выделены горизонты ОПМ, а серой — подводный оползень. Положение разрезов показано на рис. 1.

Fig. 3. Seismic sections with MTD horizons and submarine landslide marked by black and grey fillings correspondingly. Location of sections is shown on Fig. 1.

перекрыт толщей пелагических осадков мощностью около 0.06 с (~90 м). Для определения их мощности использовались данные по скоростям из работы (Watts et al., 2021).

Разрез BGR09-101 пересекает г. Джимму в самой южной части района исследований (рис. 1). В основании восточного склона этой горы, расположенного на глубине 6250 м, в разрезе стратифицированных пелагических отражений мощностью до 0.8 с (~1.2 км) выделяются два горизонта ОПМ, расположенных в средней и верхней части разреза (рис. 3). Мощность среднего горизонта ОПМ вблизи горы равна 0.37 с (~550 м) и резко уменьшается с удалением от нее до 0.125 с (~190 м), для верхнего горизонта она составляет 0.16 с (~240 м). Средний и верхний горизонты выклиниваются в восточном направлении, продолжаясь от основания Императорских гор на расстояние 56 км и 32 км, соответственно.

По одному горизонту ОПМ выделяется в основании восточного и западного склонов северной части горы Миннетонка на сейсмическом разрезе BGR09-103 (рис. 1, 3). Общая мощность разреза у восточного склона составляет

0.93 с (~1.3 км), горизонт ОПМ начинается от основания склона, располагается в середине пелагического разреза, имеет выдержанную мощность, равную 0.17 с (~250 м), и прослеживается на расстояние в 42 км.

Осадочный чехол первого комплекса вблизи западного склона имеет общую максимальную мощность до 0.57 с (~860 м). Горизонт ОПМ, находящийся в нижней части разреза, имеет мощность 0.35 с (~530 м) вблизи основания горы, которая резко уменьшается до 0.21 с (~320 м). Горизонт протягивается на расстояние в 45 км, постепенно выклиниваясь. Этот горизонт перекрывается пелагическими осадками первого комплекса и перекрывает второй комплекс, вероятно, сложенный, как отмечалось выше, туфами и продуктами их эрозии.

На профиле BGR09-107 к востоку от г. Суйсей в сейсмическом разрезе выделяются три горизонта ОПМ разделенные слоистыми рефлекторами (рис. 1, 3). Мощность нижнего горизонта ОПМ равна 0.15 с (~220 м), для среднего горизонта максимальная мощность составляет 0.36 с (~540 м), верхнего — 0.18 с (~270 м). Нижний и средний

горизонты начинаются у подножья гор и выклиниваются в северо-восточном направлении на расстоянии примерно 80 км и 110 км, соответственно. Верхний горизонт ОПМ мощностью 0.12 с (~180 м) появляется в разрезе на расстоянии 63 км от основания г. Суйсей, протягивается на 77 км и перекрыт толщей слоистых осадков мощностью 0.06 с (~90 м).

Подводные оползни. Два подводных оползня, выраженных в рельефе дна, были обнаружены на горах Тенджи и Суйсей (рис. 1). Перемещение подводного оползня, расположенного на западном склоне г. Суйсей и частично закартированного

на профиле BGR09-107 (рис. 4а) произошло без нарушения его целостности. Оползание перекрывающего западный склон горы осадочного чехла мощностью 0.42 с (~550 м) началось на глубине 4280 м. Отрыв и образование головной стенки оползня произошло ниже по склону и приурочено к изобате 4400 м. Максимальная глубина, на которой находится стенка отрыва, равна 5170 м. Ее высота колеблется от 100 м в боковых частях оползня до 300 м в его головной части, протяженность стенки составляет 23 км. На профиле BGR09-107 площадь оползневого тела, закартированная многолучевым эхолотом,

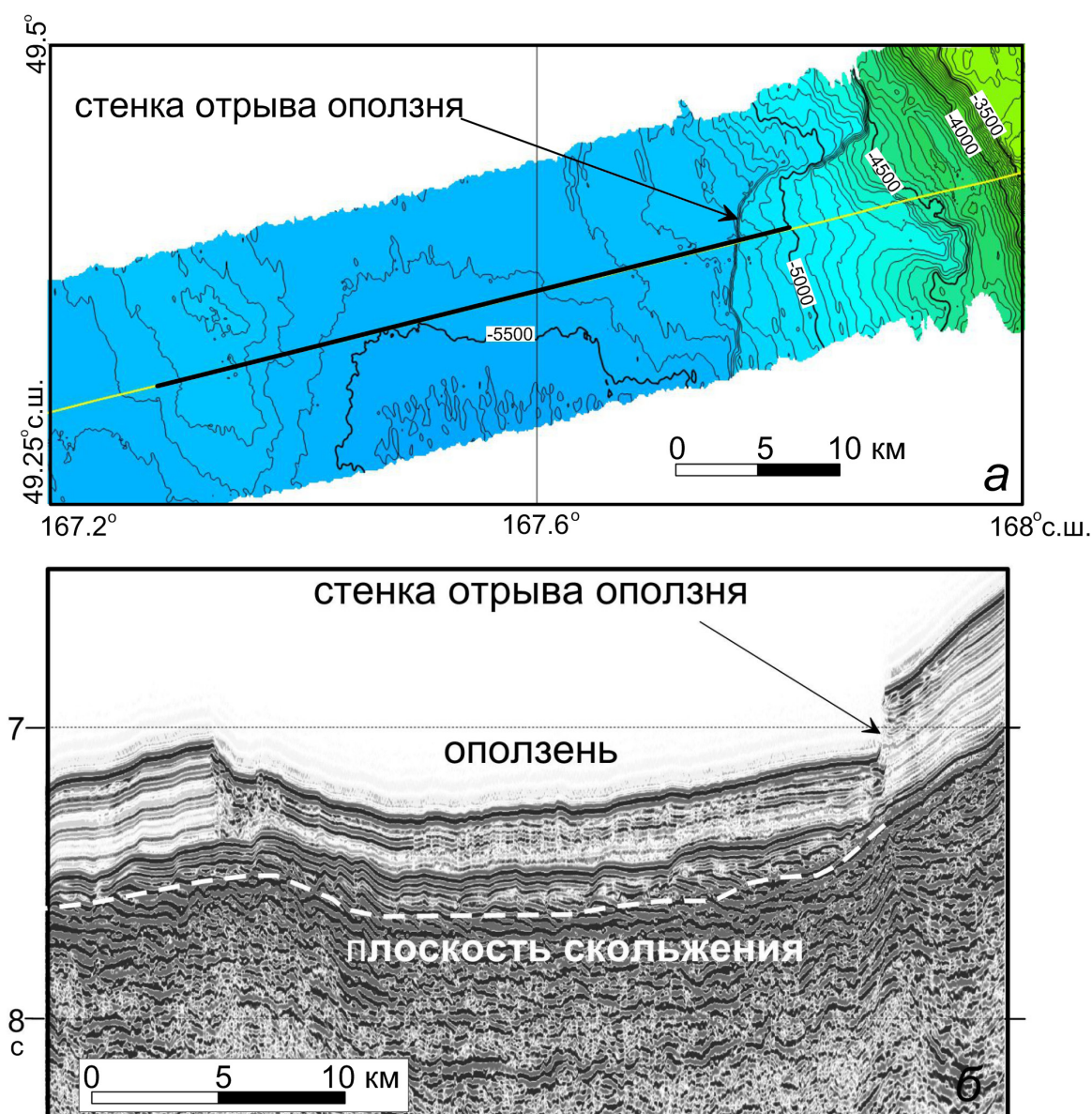


Рис. 4. Батиметрическая карта и фрагмент профиля BGR09-107: а — батиметрическая карта. Сечение изобат равно 50 м. Тонкая желтая линия маркирует сейсмический разрез, выделен жирным ее фрагмент, показанный на рис. 4а; б — сейсмический разрез, на котором видно, что нижняя часть оползня деформирована вдоль плоскости скольжения. Положение разреза см. рисунок 4а.

Fig. 4. Bathymetric map and fragment of profile BGR09-107: а — bathymetric map. Contour lines interval is 50 m. A thin yellow line indicates the seismic section, thick black line marks its fragment shown in Fig. 4а; б — seismic section demonstrating that lower part of the landslide is deformed along the sliding plane. See Fig. 4а for location.

составляет примерно 400 км^2 , величина его общей площади может быть, по нашему мнению, по крайней мере, в два раза больше.

На разрезе по особенностям сейсмического облика оползень можно разделить на две части (рис. 4б). В нижней части мощностью примерно 0.15 с ($\sim 220 \text{ м}$) наблюдаются деформации, вызванные смятием осадочного горизонта при его перемещении по плоскости скольжения. Верхняя часть разреза мощностью около 0.2 с ($\sim 300 \text{ м}$) практически не нарушена, что дает основание относить эту структуру к трансляционным оползням.

Вариант обрушения склона с возможным образованием обломочных отложений демонстрирует фрагмент профиля BGR09-105, который пересекал подводную гору Тенджи (рис. 1, 5). Здесь на переходе от плоского участка вершины к более крутому ее участку располагается контуритовый дрейф (рис. 5), который был выделен по комплексу характерных особенностей рельефа и осадочного разреза (Баранов и др., 2026).

При съемке многолучевым эхолотом вдоль профиля была закартирована южная часть контуритового дрейфа протяженностью около 15 км и установлено, что его западный борт обрушился с образованием оползня. Уступ, сформировавшийся в головной части оползня, имеет высоту до 300 м и соответствует плоскости отрыва оползня протяженностью около 7 км , при этом объем оползневого тела может достигать 11 км^3 . Сейсмические данные по строению оползня отсутствуют, но судя по холмистому рельефу его поверхности (рис. 5в), характерному для обломочных потоков (Scarselli, 2020), он мог образоваться при лавинообразном обрушении склона.

Аналогичным примером обрушения на склонах, перекрытых пелагическим комплексом, таких как на участках расчлененного рельефа в юго-восточных частях сейсмических разрезов BGR09-101 и BGR09-103, являются небольшие оползни, которые из-за своих размеров не выделяются ни на батиметрических картах, ни на сейсмических разрезах многоканального

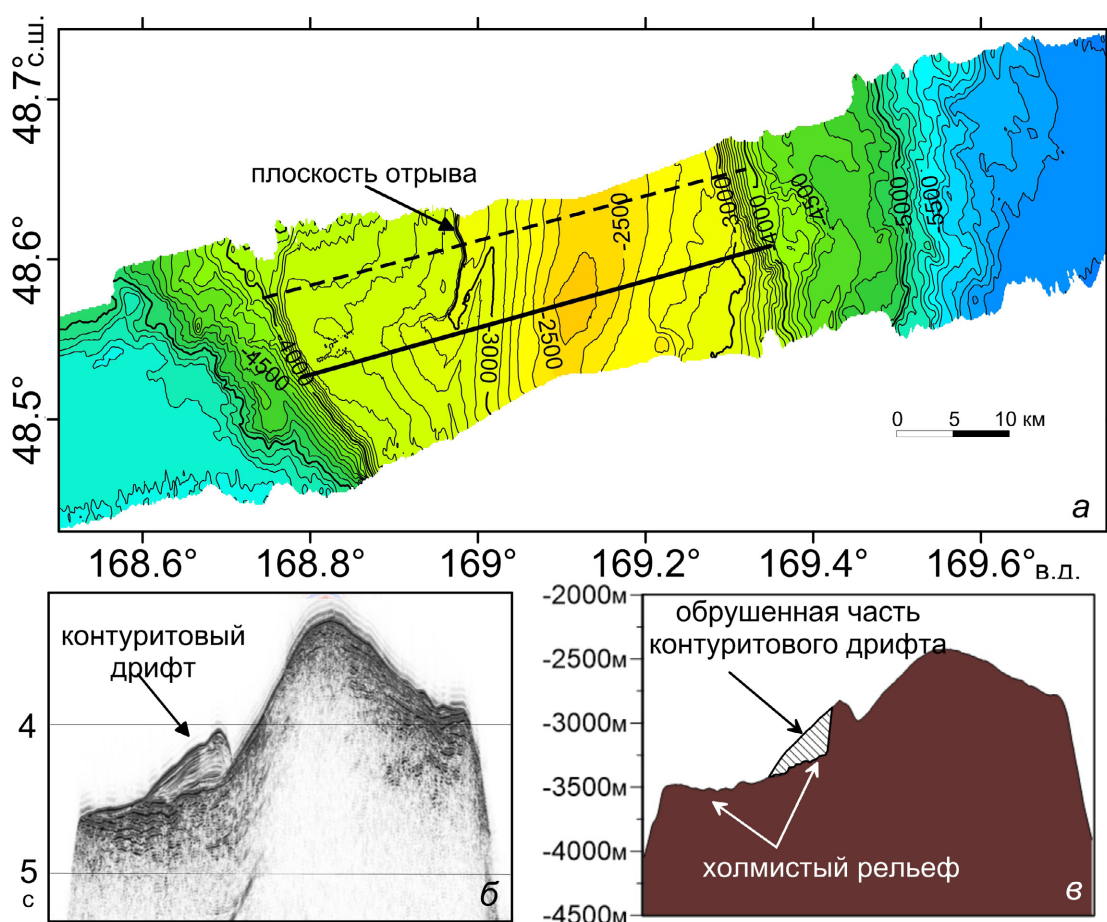


Рис. 5. Батиметрическая карта и фрагмент профиля BGR09-105: *a* — батиметрическая карта. Сечение изобат равно 100 м . *б* — сейсмический разрез; *в* — батиметрический профиль. Положение сейсмического разреза (сплошная линия) и батиметрического профиля (пунктирная линия) показано на рисунке. 5а.

Fig. 5. Bathymetric map and fragment of profile BGR09-105: *a* — bathymetric map. Contour lines interval is 100 m ; *б* — seismic section; *в* — bathymetric profile. Location of seismic section (solid line) and bathymetric profile (dashed line) is shown on Fig. 5a.

сейсмопрофилирования, но видны на записях профилографа. Данные оползни выделяются как акустически прозрачные фации ОПМ, которые заполняют депрессии, или залегают на склонах в виде акустически прозрачных линз; их мощности могут достигать 40 м и более, а протяженность составлять первые километры (Цуканов и др., 2019; Cruise Report..., 2009).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обстановки окружающей среды, наиболее благоприятные для формирования подводных оползней, включают в себя открытые континентальные склоны, системы подводных каньонов и конусов выноса, фьорды, активные речные дельты, вулканические острова и подводные горы, конвергентные и трансформные окраины (Cannals et al., 2004; Hampton et al., 1996).

Объектом исследований в настоящей статье являлась одна из подобных обстановок, а именно обстановка северного сегмента Императорских гор, где о наличии подводных оползней сообщалось ранее (Цуканов и др., 2019; Cruise Report..., 2009; Watts et al., 2021), но специальных исследований, посвященных их изучению, не проводилось. Такие исследования были выполнены на Гавайском хребте (Moore et al., 1989; Moore, Normark, 1994), где при съемке морского дна гидролокатором бокового обзора (ГБО) «ГЛОРИЯ» с 1986 г. по 1991 г. было выявлено повсеместное распространение подводных оползней на склонах островов и в близлежащих котловинах.

Всего на отрезке Гавайского хребта от о-ва Гавайи до о-ва Мидуэй протяженностью 2200 км было закартировано 68 крупных оползней каждый длиной более 20 км (Moore et al., 1989; Moore, Normark, 1994). Среди оползней были выделены обломочные лавины (англ. debris avalanche) и гигантские оползания фрагментов островных склонов (англ. slump), а также ряд их промежуточных разновидностей. Первые являются относительно маломощными (0,4–2 км) с отчетливыми головными цирками и неровным блоковым рельефом в своих дистальных частях. Каждая обломочная лавина, по-видимому, является единичным событием в терминах геологического времени и служит свидетельством мгновенного обрушения склона. В отличие от этого оползание представляет собой постепенное и периодическое перемещение вниз по склону крупных по 10 км мощностью сцепленных блоков островодужного склона (Moore et al., 1989). Обрушение склонов, в результате которых происходило формирование этих отложений, начиналось при зарождении каждого индивидуального вулкана в виде маленькой подводной

горы, достигало кульминации ко времени окончания субэдрального формирования щитовой постройки и, по всей видимости, долго продолжалось после затухания вулкана (Moore, Normark, 1994).

Последнее подтверждается выполненным в настоящей работе анализом батиметрических и сейсмических данных, который позволил выделить на северном сегменте Императорского хребта ряд ОПМ и оползневых структур, свидетельствующих о четырех эпизодах обрушения склона. Первые три эпизода выделяются в толще пелагических осадков и маркируются горизонтами, образованными ОПМ (рис. 3). В четвертый эпизод, который затрагивал только пелагические осадки, происходило формирование подводных оползней, которые отчетливо выделяются в рельефе (рис. 4, 5).

Нижний горизонт ОПМ, являющийся самым древним и представляющий первый эпизод обрушения, появляется на двух разрезах к северо-востоку и юго-западу от Императорских гор (рис. 3). Он начинается от их основания и залегает на комплексе, который, вероятно, сложен туфами и продуктами эрозии, связанными с началом роста подводных гор (Cruise Report..., 2009; Watts et al., 2021). Средний горизонт ОПМ, соответствующий второму эпизоду, выделяется на трех разрезах. Он расположен в их центральной части, также начинается от подножья гор и является наиболее протяженным, достигая в длину 110 км. Самый молодой верхний горизонт ОПМ, принадлежащий третьему эпизоду, присутствует на двух профилях, находится в самой верхней части разреза и перекрыт маломощной толщей стратифицированных отложений. Подводные оползни четвертого эпизода, выделенные по рельефу и состоящие из пелагических осадков, были обнаружены на четырех профилях (рис. 1).

Выделенные нами четыре эпизода формирования подводных оползней на северном отрезке Императорских гор, могут быть связаны с рядом причин, а именно: вулканической активностью, высокими скоростями осадконакопления и сейсмичностью. Подводные оползни и, в особенности, наиболее крупные из них на Гавайском хребте, начинают возникать на стадии активного роста вулкана, когда он приближается к своему максимальному объему, является молодым, нестабильным и характеризуется наиболее высокой сейсмической активностью (Moore, Normark, 1994).

Гипотеза о наличии Гавайской горячей точки (Wilson, 1963; Morgan, 1972), подтвержденная данными бурения (Duncan et al., 2006), дает основание говорить, что каждый из вулканов Гавайско-Императорского хребта был сформирован над мантийным плюмом и вместе с Тихо-

океанской плитой переместился в своё современное положение. В связи этим есть все основания предполагать, что первый эпизод обрушения склонов северного сегмента Императорских гор, сформировавший нижний горизонт ОПМ, проявился на стадии роста их вулканических построек, когда они, аналогично Гавайским островам, находились над Гавайской горячей точкой (рис. 6, эпизод I). Вулканам Гавайских островов требуется около 600 тыс. лет для того чтобы вырасти с океанского дна до крупной

щитовой постройки (Moore, Clague, 1992); возраст наиболее древнего оползня равен 5 млн лет (Moore, Normark, 1994). Это свидетельствует о том, что эпизоды обрушения склонов продолжают достаточно длительное время и отдельные горизонты ОПМ могут включать в себя отложения нескольких обломочных потоков.

Во время второго эпизода обрушения склонов северного участка Императорского хребта, который, вероятно, был обусловлен новой фазой активизации вулканизма, образовался средний горизонт ОПМ (рис. 6, эпизод II). На островах эта фаза вулканизма возникает через несколько млн лет после окончания фазы постройки щитового вулкана (Moore, Clague, 1992), но в пределах изученного района, как свидетельствуют данные бурения (Kerr et al., 2005), временной интервал между этими фазами является более продолжительным. Наглядным примером является г. Детройт, где повторная активизация вулканизма началась через 24 млн лет после образования этого вулкана 76 млн лет назад и продолжалась около 20 млн лет (Kerr et al., 2005).

Верхний горизонт ОПМ присутствует на двух разрезах (рис. 3), отделяется от среднего горизонта и перекрывается стратифицированными осадками мощностью менее 100 м. Он соответствует третьему эпизоду, который произошел в результате обрушения неустойчивых масс осадков на склонах неактивных подводных вулканов (рис. 6, эпизод III). Эти осадки накопились в связи с перемещением подводных вулканов в зону дрифта Мейджи и увеличением скорости осадконакопления. Если во время первого и второго эпизодов обрушения склонов в обломочных отложениях преобладали вулканогенно-осадочные образования, то на третьем этапе в формировании ОПМ существенная роль могла принадлежать осадкам.

Четвертый эпизод обрушения склонов, судя по имеющимся у нас данным, затронул только первый комплекс, сложенный пелагическими отложениями (рис. 6, эпизод IV) и привел к образованию подводных оползней, которые хорошо выражены в рельефе дна. Свидетельством обрушения верхнего пелагического комплекса также являются небольшие оползни, которые из-за недостаточного разрешения не выделяются на разрезах многоканального сейсмического профилирования, но видны на записях профилеграфа (Цуканов и др., 2019; Cruise Report..., 2009).

Таким образом, первые два эпизода обрушения склона, в результате которых в осадочном разрезе появились нижний и средний горизонты ОПМ, могут быть связаны с вулканической активностью. Нижний горизонт, аналогично оползням на Гавайском хребте, сформировался при росте щитового вулкана, для среднего

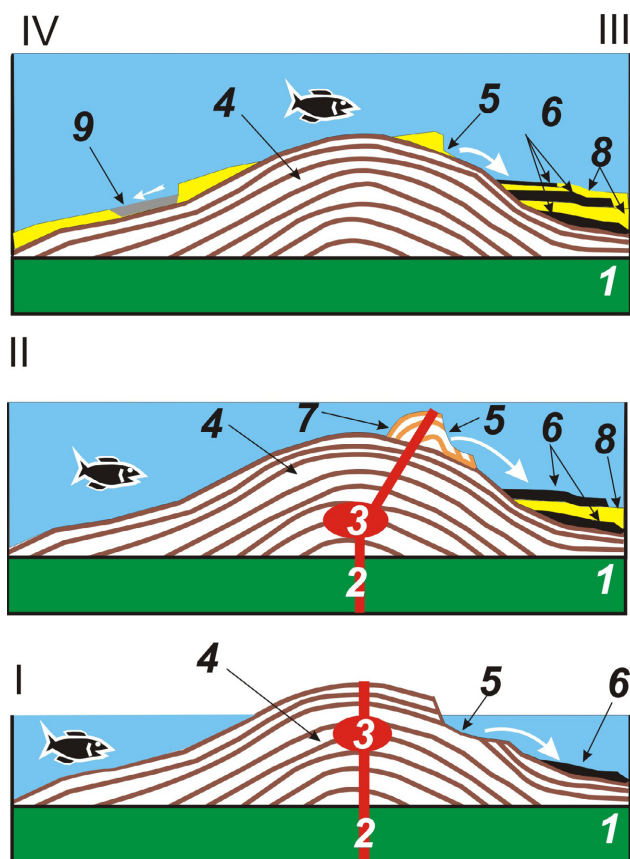


Рис. 6. Модель формирования подводных оползней и оползневых отложений в результате четырех (I–IV) эпизодов обрушения склонов северного отрезка Императорских гор (вне масштаба): 1 — океаническая кора; 2 — магматический канал; 3 — магматическая камера; 4 — постройка щитового вулкана; 5 — обрушение склона; 6 — ОПМ; 7 — вторичная вулканическая постройка; 8 — пелагические осадки; 9 — подводный оползень. Стрелкой показано направление перемещения материала. См. текст для дальнейшего пояснения.

Fig. 6. Model of the submarine landslides and mass transport deposits formation resulting from four (I–IV) episodes of slope failure in the northern Emperor Mountains Chain (not to scale). 1 — oceanic crust; 2 — magma channel; 3 — magma chamber; 4 — edifice of shield volcano; 5 — slope failure; 6 — MTD; 7 — secondary volcanic edifice; 8 — pelagic deposits; 9 — submarine landslide. Arrow shows direction of deposits transport. See text for further explanations.

горизонта ОПМ можно предположить, что он возник при вторичной активизации вулканического процесса, связанного с изменением направления перемещения литосферных плит.

Третий и четвертый эпизоды обрушения склона, вероятно, были обусловлены накоплением в дрифте Мейджи осадков, которые поступали из Берингова моря, и мощность которых увеличивалась по мере приближения Императорских гор к Алеутской островной дуге, приводя к возникновению нестабильных склонов.

ВЫВОДЫ

В результате анализа батиметрических карт и сейсмических разрезов, подготовленных по данным, полученным в рейсе SO201-1a на НИС «Зонне», выявлено наличие подводных оползней и обломочных оползневых отложений, образование которых произошло во время четырех эпизодов обрушения склонов северного сегмента Императорских гор.

Три из них находят отражение на сейсмических разрезах в пелагических (морских) осадках в виде горизонтов отложений перемещенного материала, которые сформировались за счет обломочных лавин и потоков, возникающих при обрушении склона. Четвертый эпизод является самым молодым и привел к формированию подводных оползней за счет обрушения верхнего комплекса пелагических осадков. Горизонты ОПМ располагаются в нижней, средней и верхней частях разрезов и, по всей видимости, отвечают крупным этапам в формировании структуры северного участка Императорских гор. Такими событиями могут являться, как в случае Гавайского хребта, активный рост вулканической постройки до своего максимального объема. В это время постройка нестабильна и характеризуется наиболее высокой сейсмической активностью (Moore, Normark, 1994).

Следовательно, возраст нижнего горизонта ОПМ в изученных сейсмических разрезах, по нашему мнению, вероятно, близок возрасту самой вулканической постройки. Средний горизонт ОПМ мог формироваться во время повторной активизации вулканизма, которая, например, для подводной горы Детройт началась через 24 млн лет после ее образования 76 млн лет назад и продолжалась около 20 млн лет (Kerr et al., 2005). Третий и четвертый эпизоды обрушения склона близки по возрасту (плейстоцен-голоцен?) и, вероятно, были обусловлены наличием неустойчивых масс осадков, которые были сформированы за счет выноса осадочного материала в Тихий океан из Берингова моря через Камчатский пролив.

Использованные в работе геофизические данные были получены в рамках российско-германского проекта КАЛЬМАР. Рейс SO201-1a на НИС «Зонне» финансировался Министерством образования и исследований Германии. Авторы выражают благодарность начальнику экспедиции д-ру Кристофу Гедике за предоставленную возможность использовать результаты первичной обработки данных и полезные обсуждения.

Авторы благодарны двум анонимным рецензентам и редактору за сделанные замечания, которые позволили улучшить восприятие представленных в работе данных и выводов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0018).

Список литературы [References]

- Агапова Г.В., Виноградова Н.В., Кашникова И.П. Словарь географических названий форм подводного рельефа / Ред. Г.В. Агапова. М: ГИН РАН, 1992. 311 с. [Agapova G.V., Vinogradova N.V., Kashnikova I.P. Dictionary of geographical names of the submarine bottom forms // Ed. G.V. Agapova. M: GIN RAS, 1992. 311 p. (in Russian)].
- Баранов Б.В., Цуканов Н.В., Гедике К. и др. Морфология и особенности строения зоны субдукции в районе сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 611–624. <https://doi.org/10.31857/S0030157422040025> [Baranov B.V., Tsukanov N.V., Gaedicke Ch. et al. Morphology and structural features of the subduction zone in the vicinity of Kurile-Kamchatka-Aleutian junction // Oceanology. 2022. T. 62. № 4. P. 528–539. <https://doi.org/10.1134/s0001437022040026>].
- Баранов Б.В., Цуканов Н.В., Дозорова К.А. Контуритовые дрифты на вершинах Императорских подводных гор, северо-запад Тихого океана // Материалы научно-практического форума с международным участием «Современные вопросы литологии, морской геологии, геохимии и петрофизики – 2026. Наука. Обучение. Практика». М: Макспресс, 2026. С. 58–61 [Baranov B.V., Tsukanov N.V., Dozorova K.A. Contourite drifts on tops of the Emperor Seamounts Chain, North-West Pacific // Proceedings of the scientific and practical forum with international participation «Modern issues of lithology, marine geology, geochemistry and petrophysics – 2026 Science. Training. Practice». Moscow: Maxpress, 2026. P. 58–61 (in Russian)].
- Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. 191 с. [Seliverstov N.I. Geodynamics of the Kurile-Kamchatka and Aleutian Island Arcs junction. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamGU, 2009. 191 p. (in Russian)].
- Цуканов Н.В., Дозорова К.А., Гедике К. Особенности строения верхней части осадочного чехла и оползневые структуры в северо-западной части Тихого океана и Берингова моря по данным сейсмоаку-

- стического профилирования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 1. Вып. 41. С. 73–84. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-73-84> [Tsukanov N.V., Gaedicke Ch., Dozorova K.A. Structure features of the upper part of the sedimentary cover and landslide structures in the northwestern Pacific Ocean and the Bering Sea according to seismoacoustic profiling data // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019. № 1(41). P. 73–84. (in Russian)].
- Canals M., Lastras G., Urgeles R. et al. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project // Marine Geology. 2004. V. 213. № 3. P. 9–72.
- Chen J., Zou J., Zhu A. et al. Geochemistry of surface sediments from the Emperor Seamount Chain, North Pacific // Frontiers in Earth Science. 2021. V. 9:674842. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.674842>
- Cruise Report SO201 Leg 1a: KALMAR (Kurile-Kamchatka and Aleutian Marginal Sea-Island Arc Systems: geodynamic and climate interaction in space and time). Kiel: BMBF, 2009. 109 p.
- Duncan R.A., Tarduno J.A., Scholl D.W. Leg 197 synthesis: Southward motion and geochemical variability of the Hawaiian hotspot // Eds. Duncan R.A. et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 2006. Ocean Drilling Program // Texas: A&M University, 2006. V. 197. № 2. P. 1–39. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.197.001.2006>
- Freitag R., Gaedicke Chr., Tsukanov N. et al. The Krusenstern Fault, NW Pacific: A Reactivated Cretaceous Transform Fault? // Abstracts. JKASP-2011. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2011. P. 180.
- Huang S., Regelous M., Thordarson T., Frey F.A. Petrogenesis of lavas from Detroit Seamount: geochemical differences between Emperor chain and Hawaiian volcanoes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2005. V. 6:Q01L06. <https://doi.org/10.1029/2004GC000756>
- Hampton M.A., Lee H.J., Locat J. Submarine Landslides // Reviews of Geophysics. 1996. V. 34. № 1. P. 33–59. <https://doi.org/10.1029/95rg03287>
- Keller R.A., Fisk M.R., White W.M. Isotopic evidence for Late Cretaceous plume – ridge interaction at the Hawaiian hotspot // Nature. 2000. V. 405. № 6787. P. 673–676. <https://doi.org/10.1038/35015057>
- Kerr B.C., Scholl D.W., Klemperer S.L. Seismic stratigraphy of Detroit Seamount, Hawaiian-Emperor seamount chain: Post-hot-spot shield-building volcanism and deposition of the Meiji drift // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2005. № 6. Q07L10. <https://doi.org/10.1029/2004GC000705>
- McAdoo B.G., Pratson L.F., Orange D.L. Submarine landslide geomorphology, US continental slope // Marine Geology. 2000. V. 169. № 1–2. P. 103–136. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00050-5)
- Moore J.G., Clague D.A., Holcomb R.T. et al. Prodigious submarine landslides on the Hawaiian Ridge // Journal of Geophysical Research. 1989. V. 94. № B12. P. 17465–17484.
- Moore J.G., Clague D.A. Volcano growth and evolution of the island of Hawaii // Geological Society of America Bulletin. 1992. V. 104. № 6. P. 1471–1484.
- Moore J.G., Normark W.R. Giant Hawaiian landslides // Annual Review Planetary Sciences. 1994. V. 22. № 5. P. 119–144.
- Morgan W.J. Deep mantle convection plumes and plate motions // Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 1972. V. 56. №3. P. 203–213.
- Nürnberg D. RV SONNE Cruise Report SO264-SONNE EMPEROR: The Plio/Pleistocene to Holocene Development of the Pelagic North Pacific from Surface to Depth -Assessing its Role for the Global Carbon Budget and Earth's Climate, Suva (Fiji)-Yokohama (Japan), 30.6 - 24.8.2018 // Ed. Nürnberg D. GEOMAR Report. N. Ser. 046. Kiel: GEOMAR, 2018. 284 p. https://doi.org/GEOMAR_REP_NS_46_2018
- Posamentier H.W., Martinsen O.J. The character and genesis of submarine mass-transport deposits: insights from outcrop and 3D seismic data // Eds. Shipp R.C., Weimer P., Posamentier H.W. Mass-Transport Deposits in Deepwater Settings / SEPM Society for Sedimentary Geology. 2011. V. 96. № 7. P. 7–38. <https://doi.org/10.2110/sepmsp.096.007>
- Scarselli N. Submarine landslides, architecture, controlling factors and environments. A summary // In: Regional Geology and Tectonics: Principles of Geologic Analysis. Elsevier B.V. Pub. 2020. P. 417–439. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64134-2.00015-8>
- Scholl D.W., Hein J.R., Marlow M., Buffington E.C. Meiji sediment tongue: North Pacific evidence for limited movement between the Pacific and North American plates // Geological Society of America Bulletin. 1977. V. 88. № 1. P. 1567–1576. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)882.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)882.0.CO;2)
- Watts A.B., ten Brink U.S., Buhl P., Brocher T.M. A multichannel seismic study of the lithospheric flexure across the Hawaiian-Emperor seamount chain // Nature. 1985. V. 315. № 9. P. 105–111.
- Watts A.B., Grevemeyer I., Shillington D.J. et al. Seismic structure, gravity anomalies and flexure along the Emperor Seamount chain // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2021. V. 126. № 2e2020JB021109. <https://doi.org/10.1029/2020JB021109>
- Watts A.B., Xu C., Wessel P. et al. Seismic and gravity constraints on plate flexure and mantle rheology along the whole Hawaiian-Emperor seamount chain // Nature Communications. 2025a. V. 12. № 6:11013 <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65442-3>
- Watts A.B., Wessel P., Xu Ch. The effective elastic thickness along the Emperor Seamount Chain and its tectonic implications // Geophysical Journal International 2025b. V. 240. № 10. P. 61–80. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae372>
- Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian islands // Canadian Journal of Physics. 1963. V. 41. № 3. P. 863–870.

EPISODES OF SLOPE FAILURE ON THE NORTHERN EMPEROR SEAMOUNTS CHAIN AND THE SUBMARINE LANDSLIDES FORMATION

B.V. Baranov, N.V. Tsukanov, K.A. Dozorova

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 117997

Received July 25, 2026; revised September 16, 2026; accepted September 25, 2026

Slope failures and submarine landslides formation in the northern Emperor Seamounts Chain, the northern section of the Hawaiian-Emperor Ridge, were studied using bathymetric and seismic data. These data were obtained during cruise SO201-1a on the research vessel Sonne, carried out in frames of the Russian-German KALMAR project. Their analysis made it possible to identify submarine landslides and mass transport deposits, which were formed as a result of four episodes of slope failure. The two episodes could be caused by active growth of volcanoes, during which their edifices are unstable and seismic activity is the highest. The first occurred when edifices were forming over the Hawaiian hotspot. The second episode is likely related to the reactivation of volcanism that occurred due to the change of the Kula Plate motion in Eocene. The slope failure during the third and fourth episodes was likely caused by the formation of unstable sediment volumes. This material was carried out of the Bering Sea, forming the Meiji Drift, and its volume increased as the Emperor Seamounts Chain approached the Aleutian Island arc.

Keywords: Pacific Ocean, Emperor Seamount Chain, submarine landslides, debris deposits.