

УДК 551.21+551.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ОБВАЛА НА ВУЛКАНЕ КОРЯКСКИЙ И ОЦЕНКА ВУЛКАНООПАСНОСТИ ДЛЯ ЕЛИЗОВСКО-ПЕТРОПАВЛОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ (КАМЧАТКА)

© 2024 г. А. А. Долгая*, О. В. Бергаль-Кувикас

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия
e-mail: adolgaya@kscnet.ru

Поступила в редакцию 04.08.2023 г.

После доработки 06.10.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2024 г.

На основе моделирования потенциального обвала на вулкане Корякский показано наиболее вероятное направление движения обломочной лавины. Периодическая фумарольная активизация вулкана свидетельствует о циркуляции метеорных вод и благоприятных условиях для замещения коренных пород постройки вулкана с развитием обвальных отложений. На основе спутниковых данных изучены деформации земной поверхности. Северо-восточные склоны Корякского вулкана вздымаются относительно опускающихся юго-западных склонов. Учитывая тот факт, что в 10 км от вулкана Корякский находится вулкан Авачинский, формировавший мощные обвально-взрывные отложения в истории своего развития, актуальность данного исследования крайне высока. Так как в пределах Елизовско-Петропавловской агломерации (включающей в себя города Елизово, Петропавловск-Камчатский и прилегающие населенные пункты Елизовского района), находящейся в непосредственной близости от Корякского вулкана, проживает более половины всего населения Камчатского края и располагаются предприятия, приносящие более половины всей прибыли региона, оценка опасных природных процессов на вулкане с целью дальнейшей разработки плана по минимизации их негативных последствий является критически важной для экономики Камчатки.

Ключевые слова: гравитационный обвал, обломочная лавина, вулканическая опасность, Корякский вулкан, Камчатка

DOI: 10.31857/S0203030624030063, EDN: JQAYTH

ВВЕДЕНИЕ

Обвальные отложения весьма распространены и известны на многих вулканах мира, таких как: Роке-Нубло, Канарские острова, Испания [Cacho et al., 1994], Таранаки, Новая Зеландия [Roverato et al., 2015], Антуко, Чили [Romero et al., 2022], Шаста, Калифорния, США [Crandell, 1989], Ирига, Филиппины [Yoshida, 2013]. На Камчатке около 30 активных вулканов, на 18 из которых были зафиксированы многочисленные обвалы от небольших (от 0.001 км³) до катастрофических (20–30 км³) объемов [Ропомарева et al., 2006]. С развитием современных геоинформационных технологий

появилась возможность моделировать потенциальную опасность от обломочных лавин на вулканах, например, для вулкана Сюпхан в Турции [Ozdemir et al., 2016], Пико де Танситаро в Мексике [Morelli et al., 2010], Ирига на Филиппинах [Minimo, Lagmay, 2016]. Для Корякского вулкана в 1995 г. В.В. Адушкиным с коллегами [1995] был рассмотрен механизм разрушения постройки вулкана, связанный с пластовым субгоризонтальным внедрением магмы из питающего канала в тело вулканической постройки.

За прошедшие с того момента почти 30 лет появилось большое количество новых технологий

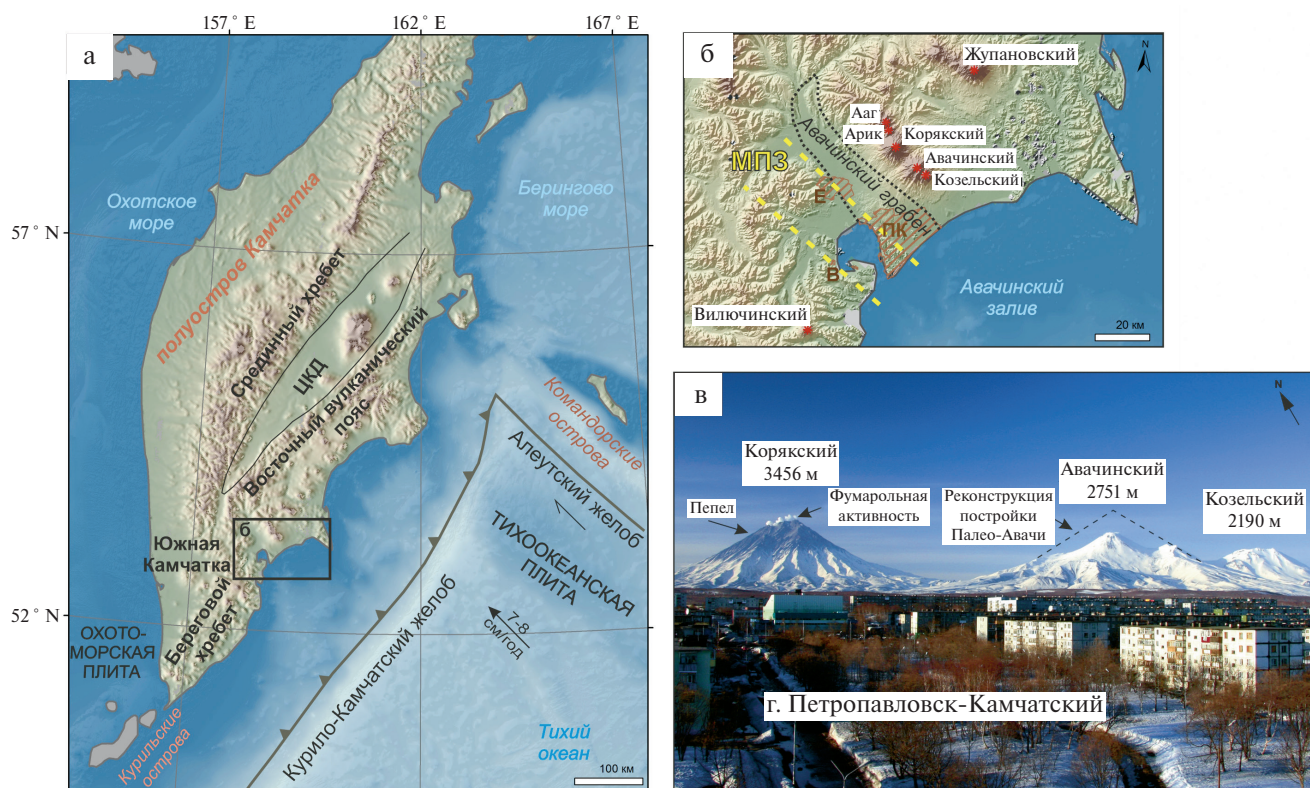


Рис. 1. Полуостров Камчатка (а), район Авачинского залива (б) и вид на Авачинскую группу вулканов со стороны г. Петропавловска-Камчатского (в).

ЦКД — Центральная Камчатская депрессия; ПК — г. Петропавловск-Камчатский, Е — г. Елизово, В — г. Вилючинский; МПЗ — Малко-Петропавловская зона поперечных дислокаций. Фото А.В. Сокоренко. Дата съемки: 26.04.2009.

Высоты вулканов даны по [Масуренков и др., 1991]. Высота постройки Палео-Авачи могла составлять, по оценкам, около 3700 м (личное сообщение М.Ю. Пузанкова, ИВиС ДВО РАН, 2022). Границы Авачинского грабена (Авачинской депрессии) даны по [Поздеев, 2003].

и методик изучения вулканических процессов, наблюдалась еще одна активизация вулкана Корякский, что в совокупности определило цель настоящей работы — смоделировать потенциальный обвал на вулкане Корякский с применением современных геоинформационных технологий и изучить возможные сценарии развития ситуации. Особенно важно отметить, что на вулкане Авачинский, расположенном в 10 км от Корякского вулкана, в позднем плейстоцене произошел катастрофический обвал с объемом материала около 16–20 км³ [Ronomareva et al., 2006]. Учитывая, что Корякский и Авачинский вулканы находятся в единой геодинамической обстановке и принадлежат одной вулканической группе, повторение схожего сценария на вулкане Корякский вполне вероятно. Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что Корякский вулкан расположен в 30 км от городов Петропавловска-Камчатского и Елизово,

в которых проживает около 77% (~220 тыс. чел.) населения всего Камчатского края [База ..., 2023]. Таким образом, изучение потенциальной опасности от обвальных отложений вулкана Корякский важно для понимания возможных рисков и развития экономической и хозяйственной деятельности региона в будущем.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ АВАЧИНСКО-КОРЯКСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

Авачинско-Корякская группа вулканов расположена на юге Восточного вулканического пояса Камчатки (рис. 1б). Этот регион отличается сложным геологическим строением ввиду наличия границы аккреции Кроноцкой палеодуги [Авдейко, Бергаль-Кувикас, 2015; Lander, Shapiro, 2007] и долгоживущей системы Южной Камчатки, в том числе и Берегового хребта

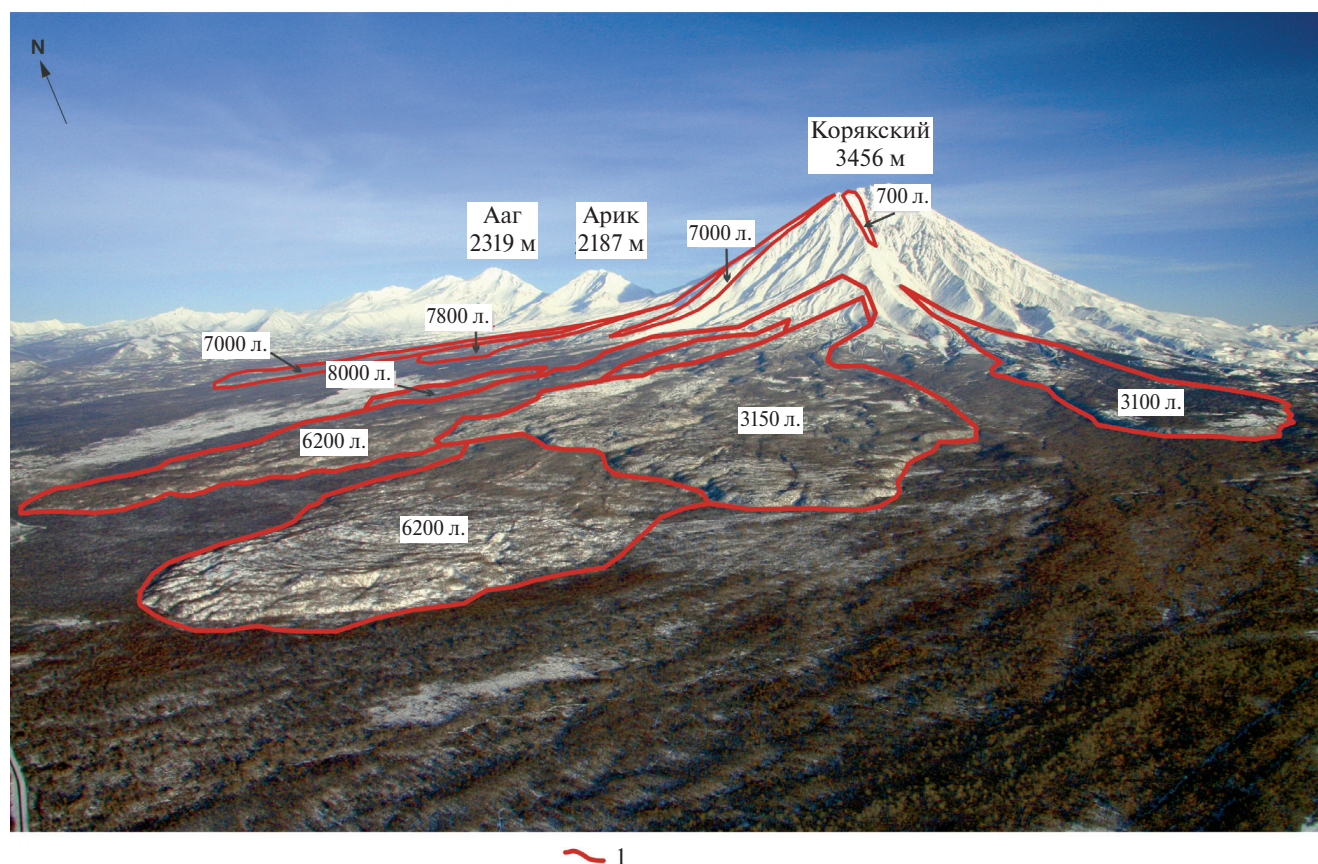


Рис. 2. Лавовые потоки вулкана Корякский. Высоты вулканов — по [Масуренков и др., 1991]. Контуры и возраст (календарных лет) лавовых потоков — по [Пономарева и др., 2016; Голоценовый ..., 2023]. Фото А.В. Сокоренко. 1 — контуры лавовых потоков.

[Бергаль-Кувикас, Рогозин, 2023]. Эта граница выражена Авачинским трансформным разломом на слэбе [Андреев, 1993], подтвержденным данными мантийной томографии [Bushenkova et al., 2023]. Результаты электроразведочных работ и гравиметрической съемки свидетельствуют об аномальной зоне Авачинского грабена, осложненного вулcano-тектоническими депрессиями Авачинско-Корякской группы вулканов [Мороз, Гонтовая, 2003; Нурмухамедов, 2016]. На земной поверхности Центральной Камчатки фиксируются многочисленные разрывные нарушения Мало-Петропавловской зоны поперечных дислокаций, к которым приурочены моногенные конусы и гидротермально-магматические системы [Агибалов и др., 2023].

Авачинско-Корякская группа вулканов представлена линейным рядом вулканов, вытянутым в северо-западном направлении, т. е. вкост Восточному вулканическому поясу (см. рис. 1). Группа состоит из вулканов (с запада на восток):

Ааг (2319 м), Арик (2166 м), Корякский (3456 м), Авачинский (2751 м) и Козельский (2190 м). Общая площадь связанных с этими вулканами отложений равна ~2000 км². До высоты около 1000 м отдельные вулканы группы не обособляются, отложения их подножий образуют изометричный аккумулятивный пьедестал диаметром 40–50 км [Масуренков и др., 1985]. По данным Государственной геологической карты [2000], Авачинско-Корякская группа вулканов относится к плейстоцен-голоценовой андезитовой формации. Вулкан Корякский расположен в 230 км от желоба и по изотопно-геохимическим характеристикам лав принадлежит к тыловой части вулканического пояса [Bergal-Kuvikas et al., 2022]. Результаты магнитотеллурического зондирования свидетельствуют о питании активных вулканов Авачинско-Корякской группы по разломам Мало-Петропавловской зоны поперечных дислокаций [Мороз, Логинов, 2019] и насыщении флюидами территории Авачинского грабена [Мороз, Гонтовая, 2001]. По данным

Таблица 1. Сведения об исторической активности вулкана Корякский

Год активности	Тип активности		Дополнительная информация	Источники
	фумаролы	пепловые выбросы		
1827	+			[Мелекесцев, 1996]
1855	+			[Мелекесцев, 1996]
1890-е?			трещина	[Мелекесцев, 1996]
1897	+			[Мелекесцев, 1996]
1904	+			[Мелекесцев, 1996]
1926	+	+		[Мелекесцев, 1996]
1931	+			[Мелекесцев, 1996]
1945	+		“очень мощно”	[Мелекесцев, 1996]
1952	+			[Мелекесцев, 1996]
1954	+		“мощно”	[Мелекесцев, 1996]
1956–1957	+	+	лахар, трещина	[Гордеев и др., 2011; Мелекесцев, 1996]
1962	+			[Мелекесцев, 1996]
1983	+			[Таран, 1985]
1984	+			[Гордеев и др., 2011]
2008–2009	+	+		[Гордеев и др., 2011]

мантийной томографии глубина магматического очага в. Корякский оценена в 7 км [Bushenkova et al., 2019].

Корякский вулкан является типичным стратовулканом с переслаиванием лавовых потоков и пирокластических толщ [Масуренков и др., 1991]. Вулкан имеет форму правильного конуса высотой 3456 м с крутыми склонами: до 35° у вершины и до 20° в средней части склонов. Диаметр основания около 20 км, относительная высота над южным подножием — 3200 м, над северным — 2399 м. Поверхность склонов изрезана глубокими барранкосами. Площадь основания вулкана — более 300 км² [Государственная ..., 2000]. В западной части вулкана расположен кратер диаметром около 200 м и глубиной до 30 м, открытый на юг. В кратере и на западном склоне вулкана на высоте 3 км находятся активные фумарольные площадки [Масуренков и др., 1991]. Моделирование равновесной формы постройки в. Корякский показало, что наряду с наличием кольцевых структур в теле постройки вулкана имеются секторы, для которых выработан гравитационно-устойчивый профиль склона [Делемень и др., 2004].

Постройка Корякского вулкана проходила в две фазы: ранняя — позднеплейстоценовая и поздняя — голоценовая [Государственная ...,

2000]. Корякский вулкан проявлял большую активность в начале голоцена, по данным тефростратиграфии зафиксировано около 60 событий [Krashenninnikov et al., 2020]. Возраст некоторых лавовых потоков в. Корякский оценивается в 8000–8200, 7800, 7150, 6700 календарных лет [Базанова и др., 2012] (рис. 2).

За последние 200 лет Корякский вулкан проявлял активность 15 раз, доминировали фреатические извержения [Мелекесцев, 1996]. Последний цикл активизации имел место в 2008–2009 гг., когда наблюдалась активная фумарольная деятельность и пеплопады [Гордеев и др., 2011] (табл. 1, см. рис. 1в). Методами спутниковой радарной интерферометрии на основе снимков японского спутника ALOS-1 были определены смещения склонов вулкана Корякский, достигающих 25 см, в период его последней активизации [Михайлов и др., 2021]. Наиболее вероятной причиной зафиксированных смещений, по мнению авторов, является внедрение магматического материала в постройку вулкана с формированием трещины с глубиной нижней кромки 0.5 км над уровнем моря, с размерами по простиранию 1.0 км, по падению 2.4 км, с углом падения от 45° до 60° [Михайлов и др., 2021].

Вулкан Авачинский, имеющий форму Сомма-Везувий, состоит из переслаиваний потоков

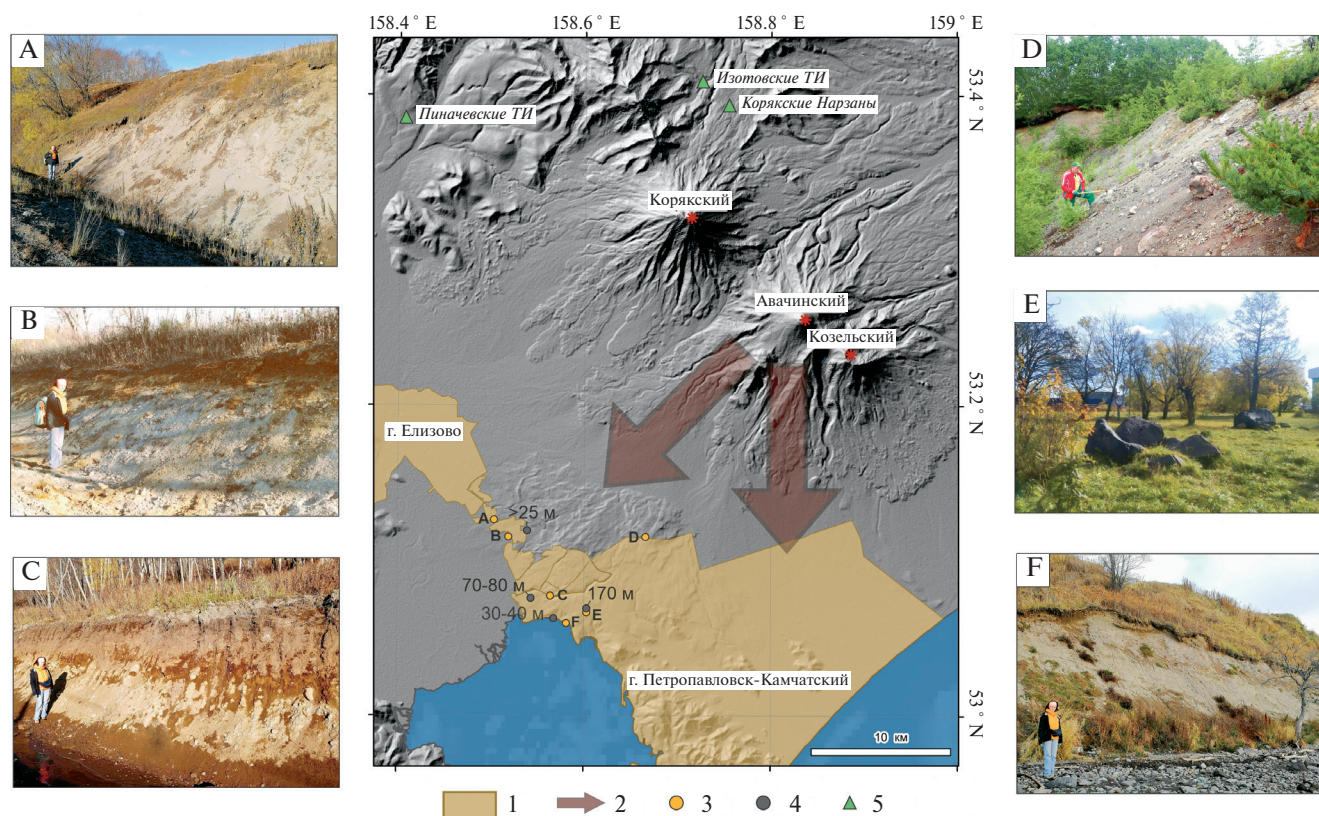


Рис. 3. Направления распространения обвально-взрывных отложений от плейстоценовых извержений Авачинского вулкана и фото представительных обнажений. Фото авторов.

1 — территории населенных пунктов Елизовско-Петропавловской агломерации; 2 — направления распространения обвально-взрывных отложений от позднеплейстоценовых катастрофических извержений Авачинского вулкана (по [Мелекесцев и др., 1991]); 3 — места съемки обнажений: А — поселок (п.) Красный, В — п. Нагорный, С — п. Крутобереговый, D — гора Лагерная, E — парк у здания ИВиС ДВО РАН, F — бухта Моховая; 4 — точки измерения мощности отложений обломочных лавин (по [Гриб и др., 1985; Мелекесцев и др., 1991]); 5 — термальные источники (ТИ).

лавы и пирокластики [Заварицкий, 1977]. Современный молодой конус Авачинского вулкана вырос на месте Палео-Авачи, имевшей, по некоторым оценкам, высоту ~3700 м (личное сообщение М.Ю. Пузанкова, ИВиС ДВО РАН, 2022) и частично разрушенной в плейстоцене в результате нескольких извержений. В работе И.В. Мелекесцева с соавторами [1991, с. 9] показано, что “в истории формирования вулкана Авачинский в позднем плейстоцене было по меньшей мере два эпизода значительного разрушения его постройки, связанных с катастрофическими извержениями типа направленного взрыва, происшедшими с интервалом в несколько (?) тысяч лет. Оба раза материал выбрасывался в юго-западном и южном направлениях”. Радиоуглеродным методом определены возраста этих катастрофических извержений — 29–30 и 35–40 тыс. лет

[Мелекесцев и др., 1991]. Ассоциированные с извержениями грубообломочные взрывные и обвальные отложения первоначально покрывали площадь около 400 км², а их объем достигал 16–20 км³ [Мелекесцев и др., 1991]. По данным И.Ф. Делемена с соавторами [1985], отложения направленных взрывов в Авачинский развиты на площади около 150 км², а у подножия Авачинско-Корякской группы вулканов, вероятно, достигают мощности порядка 300 м. В результате извержений произошла кардинальная перестройка рельефа к югу от вулкана Авачинский, нижняя по течению часть русла р. Авача была перемещена на 6–10 км [Мелекесцев и др., 1991]. Современный город Петропавловск-Камчатский и прилегающие населенные пункты расположены на обвально-взрывных отложениях в Авачинский, с максимальной измеренной мощностью 170 м (рис. 3).

К Авачинско-Корякской группе вулканов приурочены термоминеральные источники (Корякские Нарзаны, Изотовский и Пиначевский (см. рис. 3)), имеющие гидравлическую связь с зоной внедрения магм питающих систем вулканов Авачинский и Корякский [Кирюхин и др., 2015].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных в данном исследовании задач необходимо применение комплекса подходов и моделей, основанных на последних достижениях, в том числе, в сфере геоинформационных технологий.

РСА-интерферометрия

Спутники, оснащенные радаром с синтезированной апертурой (Synthetic Aperture Radar, SAR, PCA) получают снимки поверхности Земли, излучая радиолокационные сигналы и анализируя отраженный сигнал. В отличие от видимого или инфракрасного света, радиолокационные волны проходят через большую часть облаков, а также одинаково эффективны как в светлое, так и в темное время суток [Hanssen, 2001]. Радиолокационные сигналы характеризуются амплитудой и фазой. Амплитуда связана с энергией обратно рассеянного сигнала. Фаза связана с расстоянием от датчика до цели и используется для оценки смещения в интерферометрических приложениях.

Интерферометрический радар с синтезированной апертурой (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) или SAR-интерферометрия, PCA-интерферометрия — это метод измерения изменения фазы сигнала между двумя изображениями, полученными для одной и той же местности в разное время. Когда точка на поверхности Земли смещается, расстояние между сенсором и точкой изменяется, что влияет на значение фазы сигнала, записанное сенсором. Интерферограмма — это цифровое представление изменений в смещении поверхности.

Дифференциальная PCA-интерферометрия (Differential InSAR, DInSAR) отличается от InSAR тем, что топографические эффекты на получаемых интерферограммах компенсируются использованием цифровых моделей рельефа исследуемой области, в результате чего создаются дифференциальные интерферограммы.

DInSAR не является методом точного измерения смещений земной поверхности, так как в действительности измеряется проекция смещения целевой точки в направлении на спутник, однако этот метод полезен для мониторинга природных явлений, сопровождающихся интенсивными движениями земной коры, таких как землетрясения и извержения вулканов [Atzori et al., 2019; Ji et al., 2013; Sreejith et al., 2020; Wang et al., 2018; Xiong et al., 2022].

Данные InSAR незаменимы в тех случаях, когда другие методы изучения природных объектов невозможны или сильно ограничены из-за отдаленности объектов исследований, сложной логистики и неблагоприятных погодных условий в районе исследований. Ярким примером является программа исследования вулканов Алеутских островов методами PCA-интерферометрии, в ходе которой были получены важные данные о смещениях земной поверхности, сопровождавших различные этапы подготовки извержений таких вулканов, как Окмок, Уэстдал, Акутан и другие [Lu, Dzurisin, 2014].

В этом исследовании мы анализировали PCA-интерферограммы, созданные с помощью программного обеспечения SF DAAC HyP3 2022 с использованием программного продукта GAMMA. Мы работали с сервисом получения InSAR данных по запросу, доступ к которому организован на портале Vertex, созданном в Alaska Satellite Facility, подразделении Аляскинского университета в Фэрбенксе (США) [Kristenson, 2022]. Полученные данные содержат обработанные данные Copernicus Sentinel 2022, предоставленные Европейским космическим агентством (ESA). При создании InSAR и DInSAR данных была использована цифровая модель рельефа Copernicus GLO-30 Public DEM с разрешением 1 с (~30 м).

Для того чтобы устранить влияние неоднородности атмосферы и других факторов, зашумляющих итоговые карты распределения деформаций, полученные интерферограммы были обработаны методом малых базовых линий (SBAS — Small Baseline Subset). Суть метода заключается в том, что пары SAR-снимков, участвующие в генерации интерферограмм, выбираются таким образом, чтобы минимизировать пространственное и временное разделение (базовую линию) между орбитами сбора

данных, тем самым смягчая явления декорреляции [Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2007]. Метод SBAS позволяет получить карты средней скорости деформации и временные серии карт деформации для каждого участка исследуемой территории.

В нашей работе для оценки деформации земной коры с помощью сервиса Vertex по методике SBAS было проанализировано 18 пар снимков исследуемого района, полученных с помощью спутника Sentinel-1 в летние месяцы в период с 2016 по 2022 гг. Для анализа подбирались пары снимков с минимальным пространственным разнесением (менее 20 м) и временным интервалом в 1 год. Все снимки, участвовавшие в анализе, были сделаны на нисходящей орбите спутника. Было проанализировано по три интерферограммы для каждого годового интервала (2016–2017, 2017–2018 и т.д.). Итоговая карта относительных вертикальных смещений представляет собой усреднение всех полученных интерферограмм.

Модель Energy cone

Для оценки опасности схода обломочных лавин на вулкане Корякский была применена модель Energy cone (“энергетический конус”). Эта модель, впервые сформулированная М.С. Malin, М.Ф. Sheridan в 1982 г. [Malin, Sheridan, 1982], является 3D-экстраполяцией модели energy line (“энергетическая линия”) [Heim, 1882]. В основу модели положена идея о том, что мобильность вулканического гравитационного потока определяется углом энергетической линии. Этот угол выражается отношением относительной высоты (H) к расстоянию латерального перемещения вулканического гравитационного потока (L). Например, если лавина начинается на высоте 4 км и спускается по склону до высоты в 1 км, пройдя при этом расстояние в 10 км, то $H/L = (4 - 1)/10 = 0.3$. Чем большее расстояние проходит поток, тем меньше отношение H/L .

Таким образом, для оценки опасности от обломочной лавины с использованием модели энергетического конуса необходимо два параметра: отношение H/L и высота обрушающегося блока H_c . Модель Energy cone используется для описания различных видов вулканических гравитационных потоков, включая пирокластические потоки, обломочные лавины и лахары.

В работах [Hayashi, Self, 1992; Sosio et al., 2012] приведено распределение различных типов оползневых процессов на вулканах (вулканические обрушения, пирокластические потоки, горные лавины и т.д.) в зависимости от значения параметра H/L и объема лавины. Отмечено, что обломочные лавины на вулканах по сравнению с другими, невулканическими, лавинами вовлекают большие объемы пород, а также распространяются на большие площади.

В работе [Ponomareva et al., 2006] параметр H/L , наряду с другими характеристиками, используется для описания обломочных лавин различных вулканов Камчатки. Можно проследить разнообразие наблюдаемых значений данного параметра (от 0.09 до 0.8) для различных обломочных лавин.

Параметр H/L применяется не только для описания уже произошедших событий, но и для моделирования событий, которые могут произойти в будущем. Такие работы проводились, например, для следующих вулканов: Мерапи (Индонезия) [Yulianto et al., 2015], Чанбайшань (граница КНДР и Китая) [Wan et al., 2012], Везувий и Флегрейские поля (Италия) [Tierz et al., 2016].

В нашем исследовании для моделирования различных сценариев схода обломочных лавин был использован инструмент Energy Cone Simulation, входящий в состав программного продукта для оценки вулканической опасности The Volcanic Hazards Assessment Support System (VHASS) [Takarada, 2017]. В этой системе реализован оригинальный графический интерфейс, в котором положение точки начала лавины может быть определено простым кликом мыши. После ввода значений высоты обрушающегося блока (H_c), минимального и максимального значения и шага изменения параметра H/L система генерирует карту с различными сценариями схода гравитационного потока в зависимости от указанных параметров.

Дальнейшая обработка и визуализация данных на карте выполнялась с помощью программных продуктов ArcGIS и Google Earth.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На итоговой карте распределения смещений земной поверхности (рис. 4) хорошо заметны

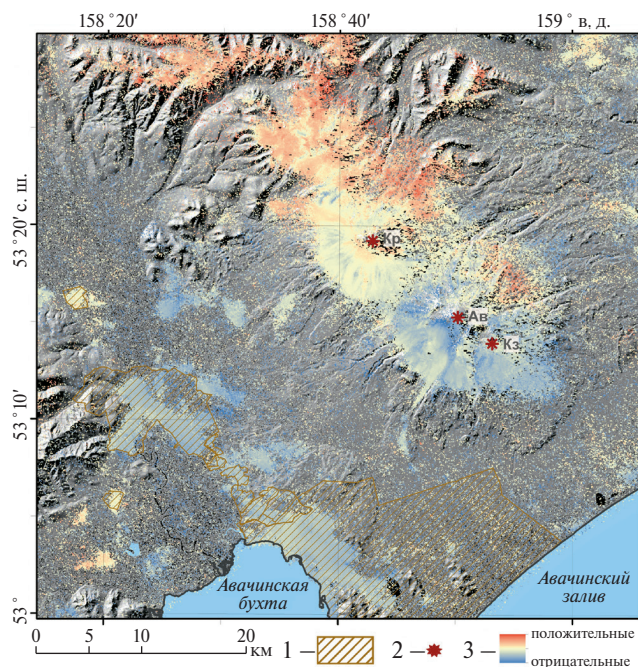


Рис. 4. Относительные деформации земной поверхности, полученные методом SBAS по InSAR-данным. Положительные деформации интерпретируются как поднятия, отрицательные — как опускания.

1 — территории населенных пунктов Елизовско-Петропавловской агломерации; 2 — вулканы: Кр — Корякский, Ав — Авачинский, Кз — Козельский; 3 — относительные деформации.

области положительных деформаций вдоль Авачинско-Корякской группы вулканов с северной стороны изучаемого района, что соответствует палеотектоническим реконструкциям и подъему значительной территории Авачинского и Восточного хребтов [Карта ..., 1977; Бергаль-Кувикас и др., 2019]. Юго-восточнее рассматриваемой группы вулканов поверхность испытывает отрицательные деформации (см. рис. 4). Эти данные свидетельствуют о том, что Корякский вулкан расположен на гетерогенном основании, возможно, разломе северо-западного простираения [Маренина и др., 1962]. Геофизические наблюдения подтверждают наличие Авачинского грабена в основании Авачинской группы вулканов [Bushenkova et al., 2023].

Анализ вулканической активности за время исторических наблюдений (рис. 5) свидетельствует о доминировании фумарольной активности с периодическими выбросами пепла. Пеплы состоят в большей степени из резургентного

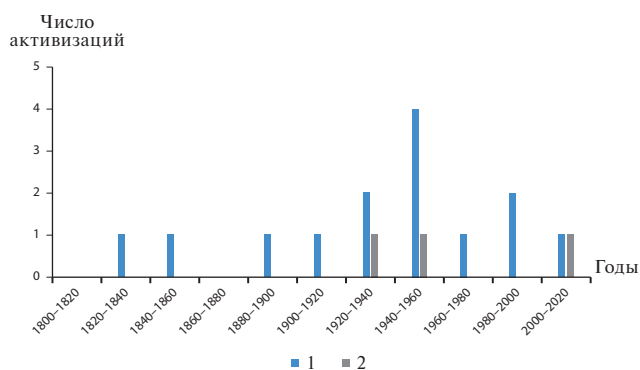


Рис. 5. Гистограмма активности вулкана Корякский в историческое время (на основе табл. 1).

1 — фумарольная активность, 2 — пепловые выбросы.

материала [Гордеев и др., 2011; Пономарева и др., 2012]. Абсолютное датирование некоторых фенокристаллов пеплов, вынесенных в результате активизации 2009 г., показало загрязнение магм гетерогенными детритовыми компонентами осадочных пород и широкий временной диапазон вариаций пород фундамента в Корякский от архея до кайнозоя [Bindeman et al., 2016]. Геофизические наблюдения на в. Корякский в 1966–2009 гг. свидетельствуют о периодической активизации разломов и попадании метеорной воды, провоцирующей проявления фумарольной деятельности на в. Корякский [Синюков, Нуждина, 2010]. Анализ сейсмических событий под вулканом во время извержения 2008–2009 гг. по данным А.В. Кирюхина [2020] показал, что кластеры землетрясений фиксируются на абсолютных глубинах до 2 км над уровнем моря. Этот факт может свидетельствовать о накапливающейся неоднородности вулканической постройки вследствие активного прогрева пород фумаролами.

Многочисленные исследования стратовулканов свидетельствуют о том, что гидротермальные изменения могут приводить к обрушению построек вулканов и формированию обвальных отложений [Kereszturi et al., 2021]. На большинстве вулканов Авачинско-Корякской группы были зафиксированы обвальные отложения [Ponomareva et al., 2006], а для в. Корякский имеются признаки дестабилизации постройки и фумарольной деятельности, прогревающей всю постройку вулкана. На основании этих данных было проведено моделирование потенциальной опасности от обвальных отложений в. Корякский.

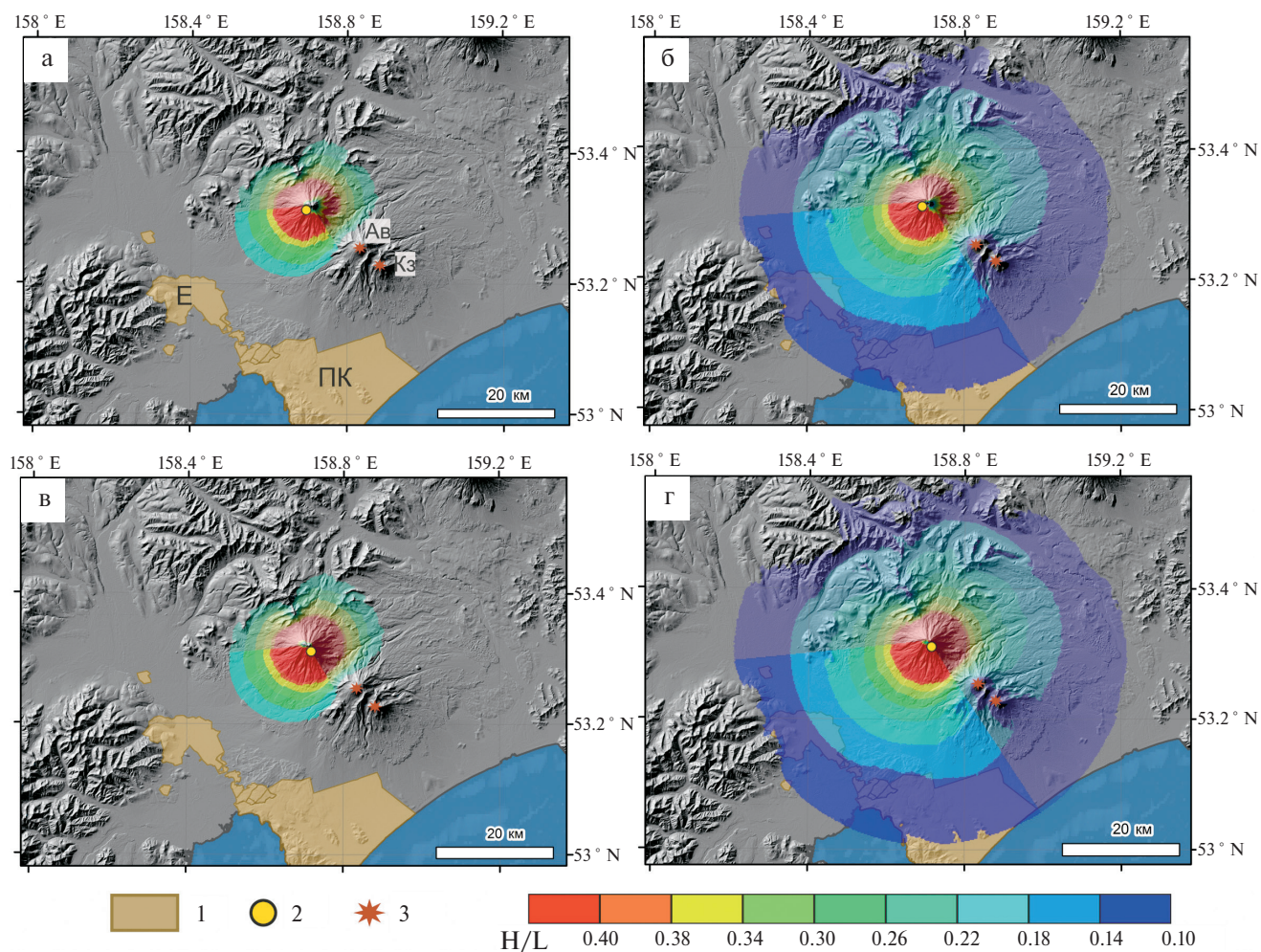


Рис. 6. Моделирование распределения параметра H/L , определяющего мобильность обломочных лавин на вулкане Корякский.

а, б – лавина начинается на юго-западном склоне; в, г – лавина начинается на юго-восточном склоне (а, в – высота обрушающегося блока 5 м, значения $H/L \sim 0.3$; б, г – высота обрушающегося блока 100 м, значения $H/L \geq 0.1$). 1 – территории населенных пунктов: ПК – Петропавловск-Камчатский, Е – Елизово; 2 – место начала движения обломочной лавины; 3 – вулканы: Ав – Авачинский, Кз – Козельский.

Результаты моделирования различных сценариев развития потенциального обвала в. Корякский с учетом рельефа земной поверхности представлены на рис. 6. Учитывались разные параметры для расчета дистанций распространения обломочных лавин. Минимальные значения (высота обрушившегося блока 5 м, $H/L \sim 0.3$) использовались, поскольку по данным [Ponomareva et al., 2006] подобные обвалы уже происходили на в. Корякский в прошлом. Максимальные значения (высота обрушившегося блока 100 м, $H/L \geq 0.1$) рассчитывались на примере распространения обваловых отложений в. Авачинский по данным [Ponomareva et al., 2006]. Использование в качестве модельных для в. Корякский параметров обвалов, имевших

место на в. Авачинский, обусловлено тем, что эти два вулкана приурочены к единой тектонической структуре, близки по возрасту и составу пород, а в позднем плейстоцене имели схожую морфологию и абсолютную высоту [Мелекесцев и др., 1991].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае потенциального обвала распространение обломочных лавин возможно на расстояние как минимум 10 км от постройки вулкана (см. рис. 6а, 6в). В случае повторения сценария на в. Авачинский ситуация может быть катастрофической и затрагивать более значительные территории (см. рис. 6б, 6г). Учитывая наличие возвышенностей с большим

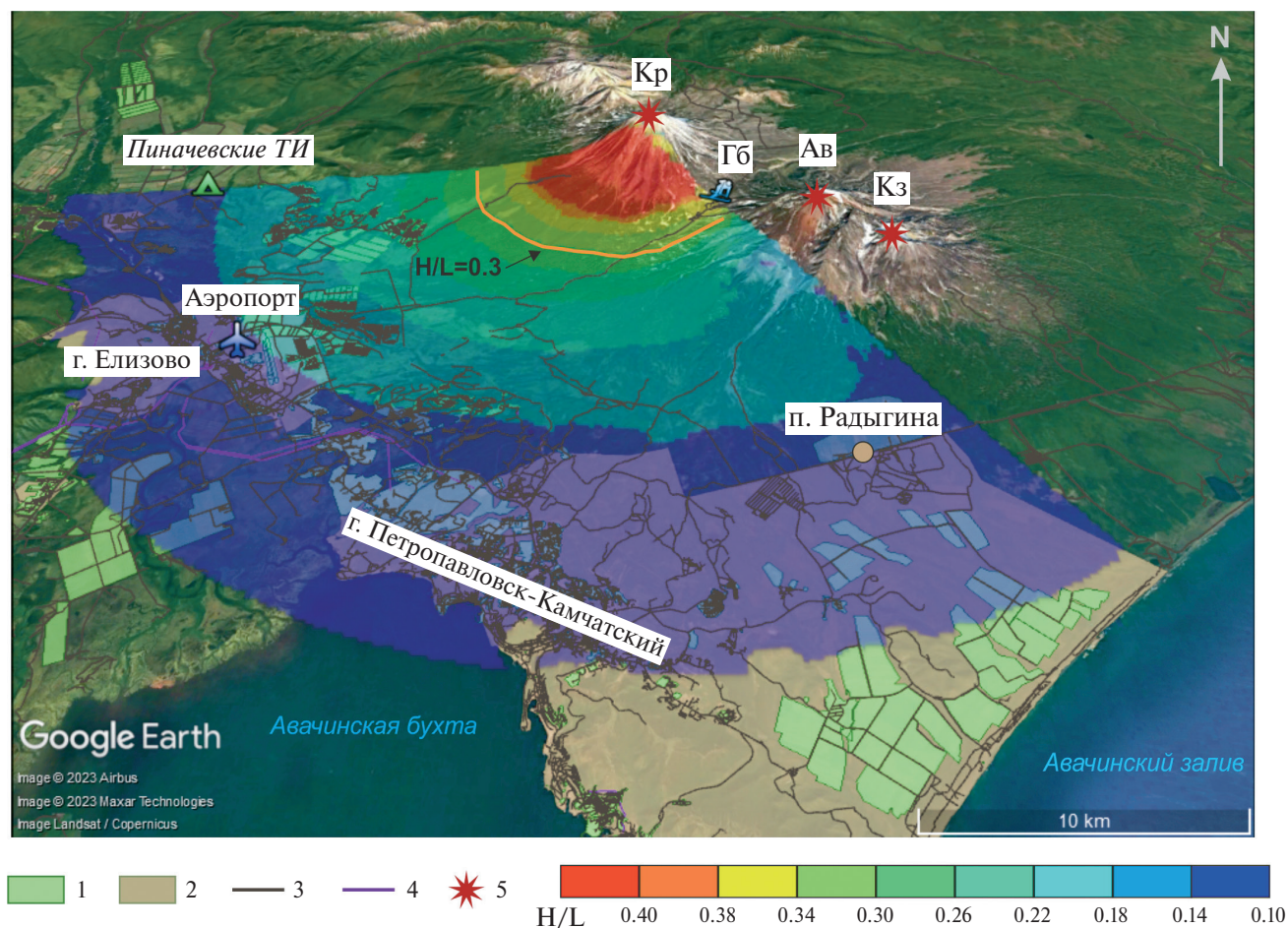


Рис. 7. Карта опасности от потенциальных обломочных лавин на вулкане Корякский. На 3D-сцену наложены области распределения параметра H/L , приведенные на рис. 6а и 6б.

1 — области землепользования (пастбища, фермы, садоводческие товарищества и др.); 2 — территории населенных пунктов; 3 — дороги, проезды; 4 — линии электропередач; 5 — вулканы: Кр — Корякский, Ав — Авачинский, Кз — Козельский. Гб — горнолыжная база, ТИ — термальные источники. 1–4 — по данным проекта OpenStreetMap [2022].

перепадом высот (вулканы Авачинский и Козельский), распространение обвальных отложений на юго-восток несколько ограничено (см. рис. 6).

Поскольку существует гетерогенность постройки в Корякский и подъем ее северо-восточной части, а обвальные отложения в Авачинский распространялись на юг и юго-запад, мы предполагаем, что доминирующим направлением распространения обвальных отложений будет являться юго-западное (рис. 7). Если предположить, что следующий обвал на вулкане будет такого же масштаба, как и известное историческое событие [Ropoteva et al., 2006], то есть будет иметь объем порядка 0.1 км^3 и распространится на расстояние 10 км, то тогда опасная область будет соответствовать

значениям параметра $H/L \sim 0.3$ (см. рис. 7, область, оконтуренная оранжевой линией). Мощность оползневых отложений в этом случае может достигать 1 м. В этом, сравнительно “благоприятном”, случае наибольшей опасности подвергнутся дачные поселки, находящиеся близко к юго-западным склонам вулкана, а также, вероятно, постройки и объекты инфраструктуры, находящиеся вдоль дороги, ведущей на перевал между вулканами Корякский и Авачинский.

Ранее В.В. Адушкин с соавторами [1995] на основе рассмотренного ими механизма разрушения вулканической постройки за счет субгоризонтального внедрения магматического вещества также предположили наиболее вероятный сценарий обвала в юго-западном направлении

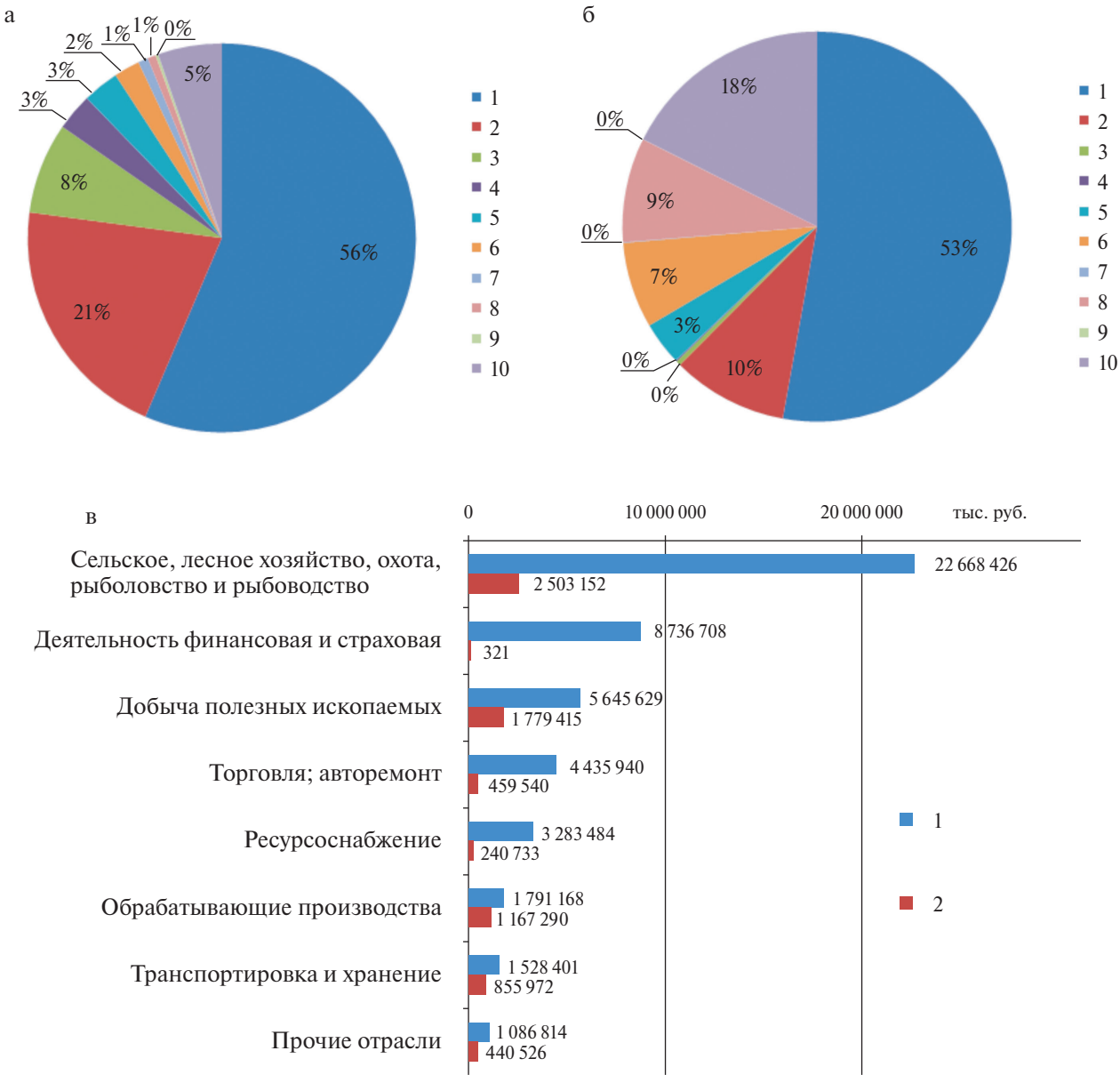


Рис. 8. Социальные и экономические показатели районов Камчатского края, по [База ..., 2023].
а — процентное распределение населения на 01.01.2023; б — процентное распределение прибыли организаций по данным бухгалтерского учета за 2021 г.; в — распределение прибыли организаций г. Петропавловска-Камчатского и Елизовского района в различных отраслях за 2021 г.
1 — Петропавловск-Камчатский городской округ; 2 — Елизовский муниципальный район (МР); 3 — Вилючинск; 4 — Мильковский МР; 5 — Усть-Камчатский МР; 6 — Усть-Большерецкий МР; 7 — Быстринский МР; 8 — Соболевский МР; 9 — Алеутский муниципальный округ; 10 — Корякский округ.

с дальностью распространения лавин 30–50 км и площадью лавинных отложений 80–1500 км², объем возможного лавинного обрушения ~8 км³. Такие параметры обломочной лавины соответствуют значениям H/L , близким 0.1, то есть области, закрашенной синим цветом на рис. 7. Это наихудший из рассматриваемых в данном исследовании сценариев, при котором в опасную зону

попадают густонаселенные районы, военные объекты, расположенные, например, в поселке Радыгина, а также объекты инфраструктуры (аэропорт и морской порт, дороги, линии электропередач и т.д.).

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики по Камчатскому краю,

на Камчатке по состоянию на 1 января 2023 г. проживало 288 730 человек [База ..., 2023], 56% которых – в столице края, а еще 21% – в Елизовском муниципальном районе (рис. 8а), в состав которого входят два других города Камчатки – Елизово и Вилучинск. Таким образом, больше половины населения Камчатского края живет в непосредственной близости от Корякского вулкана и находится в зоне риска от потенциальных обвалов.

Елизовско-Петропавловская агломерация, включающая в себя города Елизово, Петропавловск-Камчатский и расположенные между ними населенные пункты Елизовского района, является также самыми экономически развитым районом Камчатки, на нее приходится более 60% прибыли, получаемой всеми предприятиями края (см. рис. 8б). В контексте обсуждаемой в данном исследовании проблемы особенно важно, что значительный вклад в экономику Елизовского района и Петропавловска-Камчатского вносят предприятия, занятые в сельском хозяйстве, охоте и рыболовстве, добыче полезных ископаемых, обрабатывающих производствах, ресурсоснабжении (водоотведение, обеспечение электроэнергией, газом), для которых ключевую роль играют, во-первых, надежная инфраструктура (дороги, линии электропередач, логистические пункты и т.д.), а во-вторых, эксплуатация освоенных земельных участков. В связи с этим последствия схода обвалов с Корякского вулкана в масштабах, показанных на рис. 7, окажут катастрофическое воздействие на экономику всего Камчатского края. Тем важнее вести постоянный мониторинг динамики постройки Корякского вулкана, чтобы иметь возможность подготовиться и уменьшить, насколько это возможно, негативные последствия от потенциальных обвалов и последующий экономический ущерб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных спутниковой интерферометрии показано, что северо-восточные склоны постройки в. Корякский имеют положительные деформации относительно опускающихся юго-западных склонов. Периодическая фумарольная активность, извержение пеплов резургентного состава позволяют предполагать циркуляцию метеорных вод в постройке вулкана.

Это может способствовать формированию полей измененных пород и, следовательно, нарушению прочности постройки, что создает условия для обрушения вулкана с образованием обвально-оползневых отложений. Учитывая масштабность обвальных отложений находящегося рядом с изучаемым объектом в. Авачинский, проведено моделирование обвала части постройки Корякского вулкана, показан вероятный сектор такого обвала. Зона поражения от движения потенциальной обломочной лавины практически полностью охватывает территорию Елизовско-Петропавловской агломерации, что несет очень высокие риски для жизни населения и экономики Камчатского края. Для того чтобы иметь возможность уменьшить негативные последствия от процессов, происходящих на Корякском вулкане, необходим комплекс мер, включающих, как минимум, размещение в привершинной части постройки вулкана высокоточных GPS-станций, а также сети сейсмических датчиков. В случае значительных деформации постройки вулкана такой мониторинг позволит экстренным службам оперативно предпринять комплекс спасательных мер, включающих эвакуацию населения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность редакторам и анонимным рецензентам, чьи критические замечания и предложения позволили значительно улучшить качество статьи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-77-10019 (<https://rscf.ru/project/22-77-10019/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдейко Г.П., Бергаль-Кувикас О.В. Геодинамические условия образования адакитов и Nb-обогащенных базальтов (NEAB) на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 1–13. <https://doi.org/10.7868/S0203030615050028>

- Агибалов А.О., Бергаль-Кувикас О.В., Зайцев В.А., Макеев В.М., Сенцов А.А. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа, характеризующих трещиноватость верхней части литосферы, и проявлений вулканизма Малко-Петропавловской зоны // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 2. С. 122–133. <https://doi.org/10.21455/GPB2023.2-5>
- Адушкин В.В., Зыков Ю.Н., Иванов Б.А. Численное моделирование лавинообразного обрушения вулкана Корякский // Вулканология и сейсмология. 1995. № 6. С. 82–93.
- Андреев А.А. Трансформные разломы земной коры северо-запада Тихого океана // Тихоокеанская геология. 1993. № 3. С. 14–20.
- База данных “Показатели муниципальных образований”. URL: <https://gks.ru/dbscripts/munst/munst30/DBInet.cgi> (10.07.2023)
- Базанова Л.И., Пузанков М.Ю., Дирксен О.В., Кулиш Р.В., Карташева Е.В. Лавовые потоки Корякского вулкана в голоцене: успехи и проблемы датирования: материалы конференции, посвященной дню Вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 11–18.
- Бергаль-Кувикас О.В., Rogozin A.N. Актуальность исследования прибрежного вулканического комплекса в контексте истории изучения Южной Камчатки // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 5. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-5-0724>
- Бергаль-Кувикас О.В., Rogozin A.N., Кляпицкий Е.С. Использование сравнительного анализа распространения и происхождения кальдер с базальт-андезитовым составом магм для изучения генезиса миоценовых игнимбритов Восточного вулканического пояса Камчатки // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 815–828.
- Гриб Е.Н., Делемень И.Ф., Храмов Н.А. Петропавловск-Камчатский и его окрестности // Активные вулканы и гидротермальные системы Камчатки. Путеводитель научных экскурсий. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 149–163.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57-XXI, N-57-XXVII, N-57-XXXIII. Объяснительная записка. М., 2000. 302 с.
- Гордеев Е.И., Дроздин В.А., Дубровская И.К., Муравьев Я.Д., Овсянников А.А. Вулкан Корякский: современное состояние и активизация в 2008–2010 гг. // Вестник ДВО РАН. 2011. № 3. С. 25–34.
- Голоценовый вулканизм Камчатки. Электронный ресурс. URL: <http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/geoservices/hvolc.php> (17.01.2023)
- Делемень И.Ф., Уткин И.С., Уткина Л.И., Мельников Д.В., Жданова О.К. Анализ образующей вулканического конуса для выявления ослабленных секторов постройки (на примере Корякского вулкана, Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2004. № 4. С. 90–108.
- Заварицкий А.Н. Вулкан Авача на Камчатке. М.: Наука, 1977. 308 с.
- Карта новейшей тектоники СССР и сопредельных областей. Масштаб: 1:5000000. Л.: ВСЕГЕИ, 1977.
- Кириухин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. СПб.: Эко-Вектор Ай Пи, 2020. 431 с.
- Кириухин А.В., Манухин Ю.Ф., Федотов С.А., Лаврушин В.Ю., Рычкова Т.В., Рябинин Г.В., Поляков А.Ю., Воронин П.О. Геофлюиды Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна, Камчатка // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 5. С. 400–414.
- Маренина Т.Ю., Сирин А.Н., Тимербаева К.М. Корякский вулкан на Камчатке // Труды Лаборатории вулканологии. 1962. Т. 22. С. 67–130.
- Масуренков Ю.П., Егорова И.А., Пузанков М.Ю. Авачинская группа вулканов // Активные вулканы и гидротермальные системы Камчатки. Путеводитель научных экскурсий. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 107–134.
- Масуренков Ю.П., Пузанков М.Ю., Егорова И.А. Вулкан Корякский // Действующие вулканы Камчатки: в 2-х томах. Т. 2. / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. С. 228–243.
- Мелекесцев И.В. Вулкан Корякский (Камчатка): извержение 1895–1896 гг. выделено ошибочно // Вулканология и сейсмология. 1996. № 2. С. 91–95. (Melekestsev I.V. Koryakskiy Volcano, Kamchatka: Eruption of 1895–1896 was a misinterpretation // Volcanology and Seismology. 1996. V. 18. № 2. P. 237–242.)
- Мелекесцев И.В., Литасова С.Н., Сулержицкий Л.Д. О возрасте и масштабе катастрофических извержений типа направленного взрыва вулкана Авачинский (Камчатка) в позднем плейстоцене // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 3–11. (Melekestsev I.V., Litasova S.N., Sulerzhitsky L.D. On the age and scale of the directed-blast catastrophic eruption of the Avachinsky volcano (Kamchatka) in the Late Pleistocene // Volcanology and Seismology. 1992. V. 13. № 2. P. 135–146.)
- Михайлов В.О., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Смирнов В.Б. О связи активизации вулкана Корякский в 2008–2009 гг. с глубинными магматическими процессами // Физика Земли. 2021. № 6. С. 3–9. <https://doi.org/10.31857/S0002333721060041>
- Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение Южной Камчатки по геофизическим данным // Геодинамика

- и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканической геологии и геохимии (ИВГиГ) ДВО РАН, 2001. С. 58–74.
- Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 3–10.
- Мороз Ю.Ф., Логинов В.А. Глубинная геоэлектрическая модель Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. Вып. 42. № 2. С. 9–24. <https://doi.org/10.31857/S086956520002947-4>
- Нурмухамедов А.Г. Исследование геотермальных ресурсов Авачинской группы вулканов и ее флангов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S31. С. 453–477.
- Поздеев А.И. Углеродородная газогенерация Авачинской депрессии Камчатки, ее перспективы и связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 44–54.
- Пономарева В.В., Портнягин М.В., Мельников Д.В. Состав тефры современных (2009–2011 гг.) извержений вулканов Камчатки и Курильских островов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. Вып. 20. № 2. С. 20–37.
- Пономарева В.В., Зеленин Е.А., Михайлюкова П.Г. ГИС “Голоценовый вулканизм Камчатки”. Свидетельство о регистрации базы данных № 2016620587 от 12.05.2016.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмичность вулкана Корякский в 1966–2009 гг. // Труды Второй региональной научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России” (Петропавловск-Камчатский, 11–18 октября 2009 г.). Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 91–95.
- Таран Ю.А. Фумарольная активность Корякского вулкана в 1983 году // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 82–85. (Taran Yu.A. The fumarolic Activity of Koryak Volcano in 1983 // Volcanology and Seismology. 1988. V. 7. № 3. P. 439–446.)
- Atzori S., Antonioli A., Tolomei C., de Novellis V., de Luca C., Monterosso F. InSAR full-resolution analysis of the 2017–2018 $M > 6$ earthquakes in Mexico // Remote sensing of environment. 2019. V. 234. Art. 111461. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111461>
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Transact. Geoscience and remote sensing. 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383.
- Bergal-Kuvikas O., Bindeman I., Chugaev A., Larionova Y., Perepelov A., Khubaeva O. Pleistocene-Holocene monogenetic volcanism at the Malko-Petropavlovsk zone of transverse dislocations on Kamchatka: Geochemical features and genesis // Pure and applied geophysics. 2022. № 179. P. 3989–4011. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02956-7>
- Bindeman I.N., Anikin L.P., Schmitt A.K. Archean xenocrysts in modern volcanic rocks from Kamchatka: insight into the basement and paleodrainage // The Journal of Geology. 2016. V. 124. № 2. P. 247–253.
- Bushenkova N., Koulakov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E.I., Chebrov D.V., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S., Huang H.H. Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // J. of Volcanology and Geothermal Res. 2023. V. 435. Art. 107768. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107768>
- Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S., Gordeev E.I., Huang H.-H., El Khrepy S., Al Arifi N. Tomographic images of magma chambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // J. of Geophysical Research: Solid Earth. 2019. V. 124. № 9. P. 9694–9713. <https://doi.org/10.1029/2019JB017952>
- Cacho L.G., Díez-Gil J. L., Araña V. A large volcanic debris avalanche in the Pliocene Roque Nublo stratovolcano, Gran Canaria, Canary Islands // J. of Volcanology and Geothermal Res. 1994. V. 63. № 3–4. P. 217–229. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90075-2)
- Crandell D.R. Gigantic debris avalanche of Pleistocene age from ancestral Mount Shasta volcano, California, and debris-avalanche hazard zonation. Bulletin 1861. Washington, DC: US Government Printing Office, 1989. 32 p. <https://doi.org/10.3133/b1861>
- Hanssen R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Academic Publishers, 2001. 308 p.
- Hayashi J.N., Self S. A comparison of pyroclastic flow and debris avalanche mobility // J. of Geophysical Res. 1992. V. 97. P. 9063–9071. <https://doi.org/10.1029/92JB00173>
- Heim A. Der Bergsturz von Elm // Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft. 1882. V. 34. P. 74–115.
- Ji L., Lu Zh., Dzurisin D., Senyukov S. Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR // J. of Volcanology and Geothermal Res. 2013. V. 256. P. 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.02.011>
- Kereszturi G., Schaefer L., Mead S., Miller C., Procter J., Kennedy B. Synthesis of hydrothermal alteration, rock mechanics and geophysical mapping to constrain failure and debris avalanche hazards at Mt. Ruapehu

- (New Zealand) // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2021. V. 64. № 2–3. P. 421–442.
<https://doi.org/10.1080/00288306.2021.1885048>
- Krashennnikov S.P., Bazanova L.I., Ponomareva V.V., Portnyagin M.V.* Detailed tephrochronology and composition of major Holocene eruptions from Avachinsky, Kozelsky, and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // *J. of Volcanology and Geothermal Res.* 2020. V. 408. Art. 107088. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107088>
- Kristenson H.* InSAR on Demand! Ordering Sentinel-1 InSAR datasets from the Alaska Satellite Facility. 2022. URL: <https://storymaps.arcgis.com/stories/68a8a3253900411185ae9eb6bb5283d3> (19.09.2022)
- Lanari R., Casu F., Manzo M., Zeni G., Berardino P., Manunta M., Pepe A.* An overview of the Small BASeline Subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis // *Pure applied geophysics*. 2007. V. 164. P. 637–661.
<https://doi.org/10.1007/s00024-007-0192-9>
- Lander A.V., Shapiro M.N.* The origin of the modern Kamchatka subduction zone // *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*. 2007. V. 172. P. 57–64. <https://doi.org/10.1029/172GM05>
- Lu Zh., Dzurisin D.* InSAR Imaging of Aleutian volcanoes. Monitoring a Volcanic Arc from Space. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 410 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-00348-6>
- Malin M.C., Sheridan M.F.* Computer-assisted mapping of pyroclastic surges // *Science*. 1982. V. 13. P. 637–640.
<https://doi.org/10.1126/science.217.4560.637>
- Minimo L.G., Lagmay A.M.F.A.* 3D modeling of the Bui debris avalanche deposit of Iriga Volcano, Philippines by integrating shallow-seismic reflection and geological data // *J. of Volcanology and Geothermal Res.* 2016. V. 319. P. 106–123.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.03.002>
- Morelli S., Monroy V.H.G., Gigli G., Falorni G., Rocha E.A., Casagli N.* The Tancitaro debris avalanche: characterization, propagation and modeling // *J. of Volcanology and Geothermal Res.* 2010. V. 193. № 1–2. P. 93–105.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.03.008>
- OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (08.11.2022)
- Özdemir Y., Akkaya İ., Oyan V., Kelfoun K.* A debris avalanche at Süphan stratovolcano (Turkey) and implications for hazard evaluation // *Bulletin of Volcanology*. 2016. V. 78. Art. 9.
<https://doi.org/10.1007/s00445-016-1007-6>
- Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V.* Sector collapses and large landslides on Late Pleistocene–Holocene volcanoes in Kamchatka, Russia // *J. of Volcanology and Geothermal Res.* 2006. V. 158. № 1–2. P. 117–138.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.04.016>
- Romero J.E., Moreno H., Polacci M., Burton M., Guzmán D.* Mid-Holocene lateral collapse of Antuco volcano (Chile): debris avalanche deposit features, emplacement dynamics, and impacts // *Landslides*. 2022. V. 19. № 6. P. 1321–1338. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01865-z>
- Roverato M., Cronin S., Procter J., Capra L.* Textural features as indicators of debris avalanche transport and emplacement, Taranaki volcano // *GSA Bulletin*. 2015. V. 127. № 1–2. P. 3–18. <https://doi.org/10.1130/B30946.1>
- Sosio R., Crosta G.B., Hungr O.* Numerical modeling of debris avalanche propagation from collapse of volcanic edifices // *Landslides*. 2012. V. 9. P. 315–334.
<https://doi.org/10.1007/s10346-011-0302-8>
- Sreejith K.M., Agrawal R., Agram P., Rajawat A.S.* Surface deformation of the Barren Island volcano, Andaman Sea (2007–2017) constrained by InSAR measurements: Evidence for shallow magma reservoir and lava field subsidence // *J. of Volcanology and Geothermal Res.* 2020. V. 407. Art. 107107.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107107>
- Takarada S.* The Volcanic Hazards Assessment Support System for the Online Hazard Assessment and Risk Mitigation of Quaternary Volcanoes in the World // *Frontiers in Earth Science*. 2017. V. 5. Art. 102.
<https://doi.org/10.3389/feart.2017.00102>
- Tierz P., Sandri L., Costa A., Zaccarelli L., Di Vito M.A., Sulpizio R., Marzocchi W.* Suitability of energy cone for probabilistic volcanic hazard assessment: validation tests at Somma-Vesuvius and Campi Flegrei (Italy) // *Bulletin of Volcanology*. 2016. V. 78. Art. 79.
<https://doi.org/10.1007/s00445-016-1073-9>
- Wan Y., Xu J., Pan B.* Define the energy cone threshold and extent of Tianchi volcano // *J. of Earth Science*. 2012. V. 23. P. 768–774.
<https://doi.org/10.1007/s12583-012-0283-0>
- Wang T., DeGrandpre K., Lu Zh., Freymueller J.T.* Complex surface deformation of Akutan volcano, Alaska revealed from InSAR time series // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. V. 64. P. 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.001>
- Xiong W., Chen W., Wang D., Wen Y., Nie Zh., Liu G., Dijin W., Yu P., Qiao Xu., Zhao B.* Coseismic slip and early afterslip of the 2021 Mw 7.4 Maduo, China earthquake constrained by GPS and InSAR data // *Tectonophysics*. 2022. V. 840. Art. 229558.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229558>
- Yoshida H.* Decrease of size of hummocks with downstream distance in the rockslide-debris avalanche deposit at Iriga volcano, Philippines: similarities with Japanese avalanches // *Landslides*. 2013. V. 10. № 5. P. 665–672.
<https://doi.org/10.1007/s10346-013-0414-4>

Yulianto F., Tjahjono B., Anwar S. The applications of Monte Carlo algorithm and energy cone model to produce the probability of block-and-ash flows of the 2010 eruption of Merapi volcano in Central Java, Indonesia // *Arabian Journal of Geosciences*. 2015. V. 8. P. 4717–4739. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1525-5>

Simulation of a Potential Sector Collapse on the Koryaksky Volcano and Volcanic Hazard Assessment for the Yelizovo-Petropavlovsk Agglomeration (Kamchatka)

A. A. Dolgaya*, O. V. Bergal-Kuvikas

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

**e-mail: adolgaya@kscnet.ru*

Based on the modeling of a potential sector collapse on the Koryaksky volcano, the most probable direction of movement of a debris avalanche is shown. Periodic fumarole activity of the volcano indicates the circulation of meteoric waters and favorable conditions for the replacement of the volcano bedrock with the development of landslide deposits. On the basis of satellite data, deformations of the earth's surface have been studied. The northeastern slopes of Koryaksky volcano rise relative to the descending southwestern slopes. Taking into account the fact that Avachinsky volcano, which is located 10 km from the Koryaksky volcano, has formed powerful landslide-explosive deposits in the history of its development, the relevance of this study is extremely high. Within the Yelizovo-Petropavlovsk agglomeration (which includes the cities of Yelizovo, Petropavlovsk-Kamchatsky and the adjacent settlements of the Yelizovsky district), which is located in the immediate vicinity of the Koryaksky volcano, more than half of the total population of the Kamchatka region lives and there are enterprises that bring more than half of all financial profit of the region. Therefore, the assessment of hazardous natural processes on the Koryaksky volcano in order to further develop a plan to minimize their negative consequences is critical for the economy of Kamchatka.

Keywords: gravitational collapse, debris avalanche, volcanic hazard, Koryaksky volcano, Kamchatka