МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра геоморфологии и геоэкологии

**Моделирование поверхностных потоков, вызванных вулканической
деятельностью (на примере лахара чилийского вулкана Чайтен)**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 431 группы _____

направления 05.03.03 Картография и геоинформатика _____

_____ географического факультета _____

_____ Хайбулина Айдара Ильмировича _____

Научный руководитель

к.г.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Затонская

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

к.с-х.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

В.А. Гусев

инициалы, фамилия

Саратов 2025

Введение

Вулканическая деятельность является важной темой для понимания механизмов и прогнозирования извержения, а также разработки мер защиты населения и окружающей среды. Из-за этого, моделирование вулканической активности становится важным инструментом в научных исследованиях и практических применениях.

Вулкан Чайтен, расположенный в Чили, представляет собой объект особого интереса, поскольку его извержение в 2008 году продемонстрировало значительное влияние на окружающую среду и население. Исследование динамики лахарных потоков в данном регионе является важной задачей для прогнозирования возможных сценариев развития событий и обеспечения безопасности населения. В данной работе будет представлено моделирование вулканической активности на примере вулкана Чайтен с помощью программного обеспечения QGIS для геообработки данных и программным обеспечением HEC-RAS для моделирования потоков жидкости.

Целью выпускной квалификационной работы является изучение подходов и методов моделирования поверхностных потоков, вызванных вулканической деятельностью, а также прогноз последствий и выработка рекомендаций на основе полученных данных.

Исходя из поставленной цели, были сформулированы основные задачи дипломной работы:

- Изучить физические процессы, лежащие в основе вулканической активности.
- Проанализировать географические и геологические условия района исследований.
- Провести моделирование на основе двух различных реологических моделей: Бингама и Генерализованной модели Гершеля-Балкли.
- Провести сравнительный анализ полученных результатов и оценить вариативность в прогнозируемых сценариях.

– Разработать рекомендации по смягчению потенциального ущерба инфраструктуры от потока лахара.

Основное содержание работы.

1 Вулканизм: классификации, основные зоны распространения вулканов

Первый раздел включает в себя понятие вулканизма и его изучению.

Вулканизм – совокупность процессов и явлений, связанных с перемещением магмы (вместе с газами и паром) в верхней мантии и земной коре, излиянием её в виде лавы или выбросом на поверхность при вулканических извержениях. Изучение вулканической деятельности имеет важное значение для понимания её механизмов, прогнозирования возможных извержений и разработки мер по защите населения и инфраструктуры. В связи с этим, моделирование вулканической активности становится неотъемлемым инструментом для научного исследования и практического применения [1].

Вулкан – эффузивное геологическое образование, которое образуется в результате движения магмы, или расплавленной породы, из недр Земли на поверхность. Вулканы можно найти по всему миру, и они бывают самых разных форм и размеров, от маленьких конусов до массивных кальдер [2].

Вулканы можно классифицировать в зависимости от их формы:

- Щитовые вулканы.
- Стратовулканы.
- Шлаковые конусы.
- Купольные вулканы.
- Кальдеры.

По характеру извержения:

- Извержение Пелеана.
- Извержение Сурцеяна.
- Вулканическое извержение.
- Плинианское извержение.

- Стромболианское извержение.
- Исландское извержение.
- Гавайское извержение.

Вулканы встречаются во многих областях мира и часто связаны с границами тектонических плит:

- Тихоокеанское огненное кольцо.
- Срединно-Атлантический хребет.
- Средиземноморье.
- Восточноафриканский разлом.
- Индонезийский архипелаг [3].

Продукты вулканической деятельности – это совокупность материальных и химических компонентов, непосредственно образующихся в результате вулканической активности. Они могут оказывать существенное воздействие на окружающую среду, климат и населенные пункты. К основным вулканическим продуктам относятся:

1. Лава.
2. Пирокластические материалы.
3. Газы
4. Лахар

2 Моделирование геофизических процессов

Во втором разделе даётся суть моделирования геофизических систем на основе различных подходов и программных обеспечений.

Геофизика – наука, изучающая строение Земли, прежде всего земной коры, с помощью исследования естественных и искусственных физических полей. Геофизика занимает уникальное положение на стыке естественных и точных наук (математики, физики, химии, географии, геологии, астрономии) [4].

Геофизика и моделирование тесно связаны между собой, поскольку моделирование является важным инструментом, используемым в геофизике для понимания и прогнозирования геофизических процессов [5].

Существует несколько различных подходов к геофизическому моделированию:

1. Аналитическое моделирование.
2. Численное моделирование.
3. Эмпирическое моделирование.
4. Гибридное моделирование.
5. Геоинформационное моделирование.

Моделирование вулканических процессов предполагает использование специализированного программного обеспечения, позволяющего анализировать различные аспекты вулканической деятельности, такие как движение лавы, пирокластические потоки и вулканические выбросы. В зависимости объекта исследования можно выделить несколько направлений моделирования и используемых для этого программных обеспечений:

1. Моделирование лавовых потоков:

- MAGFLOW
- VOLCFLOW
- FLOW-3D

2. Пирокластические потоки и лахары:

- Titan2D
- HEC-RAS
- LAHARZ

3. Распространение вулканического пепла и газов:

- Tephra2
- FALL3D
- ASH3D

3 Моделирования вулканической деятельности

В третьем разделе описывается методика моделирования поверхностных потоков, вызванных вулканической деятельностью, на примере лахара чилийского вулкана Чайтен.

Были выбраны две модели неньютоновских жидкостей, на основе которых были смоделированы потоки лахаров – Бингамовская жидкость и Генерализованная жидкость Гершель-Балкли.

Далее, для сравнения получившихся моделей, использовались метрики бинарной классификации [6].

Для Бингамовской жидкости:

$$TP = \frac{3,233 \text{ км}^2}{6,518 \text{ км}^2} \approx 0,496$$

$$FP = \frac{1,394 \text{ км}^2}{6,518 \text{ км}^2} \approx 0,214$$

$$FN = \frac{1,900 \text{ км}^2}{6,518 \text{ км}^2} \approx 0,290$$

Для Генерализованной жидкости Гершель-Балкли:

$$TP_{\text{true positive}} = \frac{3,895 \text{ км}^2}{6,863 \text{ км}^2} \approx 0,568$$

$$FP_{\text{false positive}} = \frac{1,738 \text{ км}^2}{6,863 \text{ км}^2} \approx 0,253$$

$$FN_{\text{false negative}} = \frac{1,229 \text{ км}^2}{6,863 \text{ км}^2} \approx 0,179$$

После был рассчитан взвешенный композитный балл для смоделированных потоков основе методов Бингамовской жидкости (1) и Генерализованной жидкости Гершеля-Балкли (2):

$$(1) CS = 0,496 * ((1 - 0,214)^{1/2}) * ((1 - 0,290)^2) * 100 = 22$$

$$(2) CS = 0,568 * ((1 - 0,253)^{1/2}) * ((1 - 0,179)^2) * 100 = 33$$

После были рассчитаны другие метрики: охват затопленной территории (Ω_T), нормализованная сумма переоценок (Δ_o), нормализованная сумма недооценок (Δ_u), кумулятивная метрика (C_m) [7].

По результатам вычислений было выявлено, что модель на основе Генерализованной жидкости Гершеля-Балкли обеспечивает чуть более точное

совпадение с реальными данными, чем модель на основе Бингамовской жидкости. Это подтверждается результатами вычислений 6 из 8 метрик: TP, FN, Composite Score, Ω_{Tm} , Δ_o и C_m , которые ближе к идеальным значениям.

Так как модель потока лахара Генерализованной жидкости Гершеля-Балкли показала лучшее совпадение с реальным потоком по сравнению с Бингамовской жидкостью, на её основе был произведён расчёт потенциального ущерба инфраструктуры выходной модели.

Анализ затопленной территории города Чайтен показал, что под потенциальной угрозой затопления модели оказалось 83,5% зданий – 313 единиц. Разница между действительным и смоделированным потоком составила 6,5%. Данный результат показывает, что модель достаточно хорошо предсказывает зоны воздействия на постройки [8].

Далее был смоделирован поток с учётом защитных сооружений, анализ данного сценария показал, что под потенциальной угрозой затопления модели оказалось 9% зданий города – 34 единицы.

Сравнение двух моделей без защитных барьеров и с их учётом показало значительное сокращение зоны затопления и затопленных зданий при применении инженерных сооружений. В сценарии без барьеров город подвергся гораздо более масштабному затоплению, тогда как внедрение защитных конструкций позволило уменьшить глубину и площадь воздействия лахара.

Тем не менее, даже при наличии барьеров, частичное подтопление города сохраняется, что указывает на необходимость дальнейшего проектирования защитных решений, так как данная работа сфокусировано на картографическом анализе, а не инженерных расчётах, её основная цель – подтвердить эффективность таких мер и подчеркнуть важность грамотного инженерного планирования для минимизации рисков.

Заключение

Изучение и моделирование вулканической деятельности играют ключевую роль в понимании механизмов извержений и разработке мер защиты населения и окружающей среды. Регион Южной Америки, характеризующийся высокой вулканической активностью, является уникальным местом для изучения вулканизма. Классификация вулканов, их извержений, а также анализ исторических извержений предоставляют важную информацию для понимания этих природных процессов.

Применение современных технологий, таких как программа QGIS с прикладным программным обеспечением HEC-RAS для моделирования потоков лахара, показало, что использование различных реологических моделей и защитных сооружений оказывает значительное влияние на прогнозируемые характеристики лахаров, такие как глубина и скорость потока, что крайне важно для планирования мер по предотвращению катастроф и защите населения. Результаты исследования подчёркивают значимость моделирования для прогнозирования вулканических извержений и разработки стратегий минимизации их последствий.

Таким образом, проведённая работа демонстрирует не только теоретическую значимость изучения вулканической активности, но и применение современных инструментов моделирования, которые могут быть использованы для повышения уровня готовности не только к вулканическим извержениям, но и к другим опасным геодинамическим процессам, таким как сели, оползни и обвалы, что необходимо для защиты жизни и здоровья людей, а также сохранения окружающей среды от потенциальных угроз.

Список используемых источников.

- 1 Мархинин, Е.К. Вулканизм / Е.К. Мархинин – М. : Недра, 1985. – 288 с.
- 2 Каррыев, Б.С. Катастрофы в природе: вулканы. Гипотезы, факты, причины, последствия / Б. С. Каррыев – М. : «Издательские решения», 2016. – 226 с.

3 The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth [Электронный ресурс]: web.archive.org URL: <https://school-science.ru/14/23/49454> (дата обращения 23.03.2025). – Загл. с экрана. – Яз. англ.

4 Основы геофизических методов [Электронный ресурс]: psu.ru URL: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Hmelevskoj_osnovy_geofizicheskikh_metodov.pdf (дата обращения 23.03.2024). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

5 Шеин, А.Н. Математическое моделирование в разведочной геофизике / А.Н. Шеин, В.В. Потапов – Чита : ЗабГУ, 2017. – 125 с.

6 Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows [Электронный ресурс]: volcanbox.files.wordpress.com URL: <https://volcanbox.files.wordpress.com/2017/03/mossoux-et-al-2016.pdf> (дата обращения 27.03.2025). – Загл. с экрана. – Яз. англ.

7 Multi-Model Comparison of Computed Debris Flow Runout for the 9 January 2018 Montecito, California Post-Wildfire Event [Электронный ресурс]: agupubs.onlinelibrary.wiley.com URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2021JF006245> (дата обращения 28.03.2025). – Загл. с экрана. – Яз. англ.

8 Acute sedimentation response to rainfall following the explosive phase of the 2008–2009 eruption of Chaitén volcano, Chile [Электронный ресурс]: link.springer.com URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00445-013-0723-4> (дата обращения 26.03.2025). – Загл. с экрана. – Яз. англ.