Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 185–193
Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 185–193
https://geo.sgu.ru https://doi.org/10.18500/1819-7663-2025-25-3-185-193, EDN: OGXQWV

Научная статья
УДК 004.94:614.8+005.57

Прогнозирование динамики лахарных потоков с помощью имитационного моделирования

А. И. Хайбулин✉, А. В. Затонская

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Хайбулин Айдар Ильмирович, магистрант географического факультета, aidarkhaibulin@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0007-9731-9331
Затонская Анна Вячеславовна, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой экономической и социальной географии, farik26@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4877-207X

Аннотация. В исследовании представлены апробация и результаты имитационного моделирования поверхностных потоков, вызванных результатами вулканической деятельности. Проведён анализ различных реологических моделей с обоснованием эффективности модели генерализованной жидкости Гершеля – Балкли применительно к геодинамическим процессам (лахары, сели, обвалы и проч.). Предложенная гипотеза была проверена и подтвердила свою жизнеспособность на основании сведений о реально случившемся событии – извержении вулкана Чайтен. Результаты исследования могут стать эффективным инструментом в прогнозировании и оценке последствий иных геодинамических процессов как эндогенной, так и экзогенной природы происхождения.
Ключевые слова: имитационное моделирование, геофизические процессы, вулканическая деятельность, модели потока, лахары, ГИС, Чили, Чайтен

Для цитирования: *Хайбулин А. И., Затонская А. В.* Прогнозирование динамики лахарных потоков с помощью имитационного моделирования // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 185–193. https://doi.org/10.18500/1819-7663-2025-25-3-185-193, EDN: OGXQWV

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Prediction of Lahar flow dynamics using simulation modeling

A. I. Khaybulin✉, A. V. Zatonskaya

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Aydar I. Khaybulin, aidarkhaibulin@yandex.ru,https://orcid.org/0009-0007-9731-9331
Anna V. Zatonskaya, farik26@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4877-207X

Abstract. The study presents the testing and results of simulation modeling of surface flows caused by the results of volcanic activity. An analysis of various rheological models was carried out, with a justification for the effectiveness of the Herschel-Bulkley generalized fluid model as applied to geodynamic processes (lahars, mudflows, rockfalls, etc.). The proposed hypothesis was tested and confirmed its viability based on information about a real event – the eruption of the Chaiten volcano. The results of the study can become an effective tool in predicting and assessing the consequences of other geodynamic processes of both endogenous and exogenous origin.
Keywords: simulation modeling, geophysical processes, volcanic activity, flow models, lahars, GIS, Chile, Chaiten

For citation: Khaybulin A. I., Zatonskaya A. V. Prediction of Lahar flow dynamics using simulation modeling. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 185–193 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1819-7663-2025-25-3-185-193, EDN: OGXQWV

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Моделирование вулканической деятельности и её последствий носит важное прикладное и научное значение, поскольку около миллиарда человек (порядка 12% процентов населения Земли) проживают в радиусе 150 км от вулканов. Наряду с лавой, пирокластическими материалами, пеплом, лапилли, туфом и газами, высокую опасность представляют также и лахары – вулканические селевые потоки, состоящие из смеси воды, горных пород, вулканических обломков. Исследования лахаровых процессов активно ведутся как в России, так и за рубежом с применением разнообразных реологических и численных моделей. В России значительные достижения связаны с изучением вулканов Камчатки. Например,

© Хайбулин А. И., Затонская А. В., 2025

исследования на Ключевском вулкане анализируют роль сейсмичности и морфологии склонов в активизации обвально-оползневых процессов, способных инициировать лахары [1]. Для верификации моделей и оценки последствий реальных событий (например, лахара на Жупановском вулкане в 2015 г.) применяются методы дистанционного зондирования, полевые измерения стока наносов [2]. За рубежом широко используются специализированные программные комплексы (например, LAHARZ (USGS), FLO-2D, RAMMS), основанные на реологических моделях Бингама, Гершеля – Балкли или гранулярных потоках, позволяющие прогнозировать зоны затопления и оценивать эффективность защитных сооружений [3].

Несмотря на обширный методический арсенал, применение комплексного подхода с валидацией моделей на реальных событиях, особенно для территории Чили, в отечественных исследованиях представлено ограниченно. Все это обусловило необходимость провести анализ существующих методик моделирования результатов вулканической деятельности, а также на конкретном примере чилийского вулкана Чайтен представить рекомендации по снижению ущерба от последствий вулканического селевого потока на объекты социальной инфраструктуры г. Чайтен.

Методы исследования

Геофизическое моделирование может принимать различные формы, включая аналитические, численные и физические модели. Каждый тип моделей имеет как сильные стороны, так и ограничения, что обусловливает необходимость их комплексного использования для обеспечения более полного понимания геофизической системы. Однако, несмотря на многообразие подходов к моделированию, все большую популярность набирают геоинформационные модели, позволяющие интегрировать геофизические данные с пространственной информацией, обеспечивая всестороннее представление о недрах, а также их визуализацию.

Апробация возможностей геоинформационного моделирования проводилась на примере вулкана Чайтен, располагающегося в южной части Чили. Это кальдерный вулкан с куполом риолитового состава. Последнее крупное извержение датируется 2008 годом. В результате него произошло разрушение купола вулкана с образованием многочисленных лахар, достигших побережья Тихого океана [4].

Для процесса имитационного моделирования потоков лахара и проверки гипотезы было использовано специализированное программное обеспечение HEC-RAS, предназначенное для гидравлического моделирования не только течения рек, каналов и анализа наводнений, но также реализована поддержка неньютоновских жидкостей, подходящих для моделирования и анализа динамики селевых и вулканических потоков [5].

Основными моделями, поддерживаемыми программным обеспечением являются:

– Newtonian Assumption (Ньютоновская жидкость) – предполагает, что вязкость жидкости постоянна, и напряжение сдвига линейно зависит от скорости деформации. Пример – чистая вода. Подходит для водных потоков или сильно разбавленных суспензией. Не подходит для лахаров, так как они имеют сложные реологические свойства (нелинейное поведение);
– Bingham (Бингамовская жидкость) – используется для материалов, которые ведут себя как твёрдое тело при напряжении ниже определённого предела текучести. После превышения порога материал течёт с постоянной вязкостью. Подходит для лахаров, содержащих мелкодисперсные частицы, глинистые компоненты и воду. Этот метод хорошо описывает поведение потоков до средней концентрацией частиц;
– O'Brien Equation (уравнение О'Брайена) – полуэмпирический подход, учитывающий зависимость вязкости и напряжения сдвига от объёмной концентрации твёрдых частиц. Ориентирован на моделирование высококонцентрированных потоков. Подходит для лахаров с высокой концентрацией твёрдого материала, таких как вулканические потоки с крупными обломками;
– Clastic Grain-Flow (обломочный зерновой поток) – специализированный метод для моделирования потоков, в которых доминируют гранулометрические взаимодействия частиц. Может быть применён для лахаров, содержащих значительное количество крупных обломков, но чаще используется для специфических гранулометрических потоков;
– Generalized Herschel – Bulkley (генерализованная жидкость Гершеля – Балкли) – расширенная модель, объединяющая свойства Бингамовской жидкости. Позволяет моделировать широкий диапазон нелинейных реологических свойств. Наиболее универсальная модель для лахаров, особенно тех, которые имеют сложное реологическое поведение, включая широкий диапазон концентраций.

В качестве наиболее подходящих для моделирования пространственно-временного поведения лахаров экспериментально были определены модели Бингамовской жидкости и генерализованной жидкости Гершеля – Бакли, отвечающие всем необходимым условиям, а также входным параметрам моделирования, таким как:

– объёмная концентрация – доля твёрдых частиц, таких как песок, глина или щебень,

в общем объёме смеси, выраженная в процентах. В данном случае объёмная концентрация твёрдых частиц составила 30%. Связано это с тем, что во время извержения вулкана шли сильные дожди (20 мм осадков), спровоцировавшие лахаровый поток;
- метод наполнения – используется для учёта дополнительного объёма потока, вызванного высокой концентрацией твёрдых частиц. Это подход к моделированию, при котором общий объем потока увеличивается за счёт добавления твёрдых частиц, что влияет на гидравлические характеристики, такие как расход и глубина потока;
- постоянный предел текучести – минимальное напряжение сдвига, которое необходимо приложить к смеси, чтобы она начала течь, измеряющееся в паскалях. Это характеристика неньютоновских жидкостей, таких как грязевые потоки, которые могут вести себя как твёрдое тело при низких напряжениях и как жидкость при превышении предела текучести. В данном случае постоянный предел текучести взят в 100 Па;
- вязкость смеси – мера сопротивления смеси течению, вызванная внутренним трением между частицами и жидкостью. Для данного моделирования показатель вязкости смеси равен 1;
- показатель течения (n) – параметр, определяющий тип реологического поведения жидкости, которое делится на: псевдопластичное поведение (вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига, типично для лахаров с мелкими частицами, таких как Чайтен, $n < 1$), Бингамовская жидкость (вязкость постоянна после преодоления предела текучести, $n = 1$), дилатантное поведение (вязкость увеличивается с ростом скорости сдвига, $n > 1$). Для лахаров показатель течения меньше единицы, в данном случае показатель равен 0.5 [6, 7].

По оценкам экспертов, объем потока лахара, затопившего г. Чайтен, варьируется от 3 до 8 млн м^3 [8]. Из-за отсутствия эталонного контура потока лахара он был оцифрован на основе космических снимках данного события [9].

На основе цифровой модели рельефа (ЦМР) ALOSPALSAR с разрешением в 10 м было проведено моделирование двух потоков лахаров [10].

Рис. 1 иллюстрирует имитационные модели потоков лахара методами Бингамовской жидкости и генерализованной жидкости Гершеля – Балкли.

Базируясь на метриках бинарной классификации, был проведён сравнительный анализ полученных моделей, где основными показателями выступили:

$TP_{\text{truepositive}} = \dfrac{A_s \cap A_r}{A_s \cup A_s}$ – область пересечения между смоделированным и реальным потоками лахара; чем ближе значение к единице, тем больше смоделированный поток лахара соответствует реальному потоку;

$FP_{\text{falsepositive}} = \dfrac{A_s - (A_s \cap A_r)}{A_s \cup A_s}$ – соответствует области пересимулированного (over-simulated) потока лахара (вышедший за границы реальной лавы), измеряется от нуля до единицы; чем ближе значение к единице, тем больше площадь пересимулированной области;

$FN_{\text{falsepositive}} = \dfrac{A_r - (A_s \cap A_r)}{A_s \cup A_s}$ – соответствует области недосимулированного (ориг. under-simulated) потока лахара; чем ближе значение к нулю, тем лучше, так как большая часть реального потока была хорошо охвачена моделью;

A_r и A_s – область, охваченная реальным и смоделированным потоком.

Сумма трёх индексов равна единице [11].

Расчет значений элементов матрицы по модели Бингамовской жидкости выявил следующее: $TP_{\text{truepositive}} \approx 0.496$, $FP_{\text{falsepositive}} \approx 0.214$, $FN_{\text{falsepositive}} \approx 0.290$. Для модели генерализованной жидкости Гершеля – Балкли: $TP_{\text{truepositive}} \approx \approx 0.568$, $FP_{\text{falsepositive}} \approx 0.253$, $FN_{\text{falsepositive}} \approx 0.179$.

Для более детального сравнительного анализа результатов различных сценариев моделирования был разработан взвешенный композитный балл:

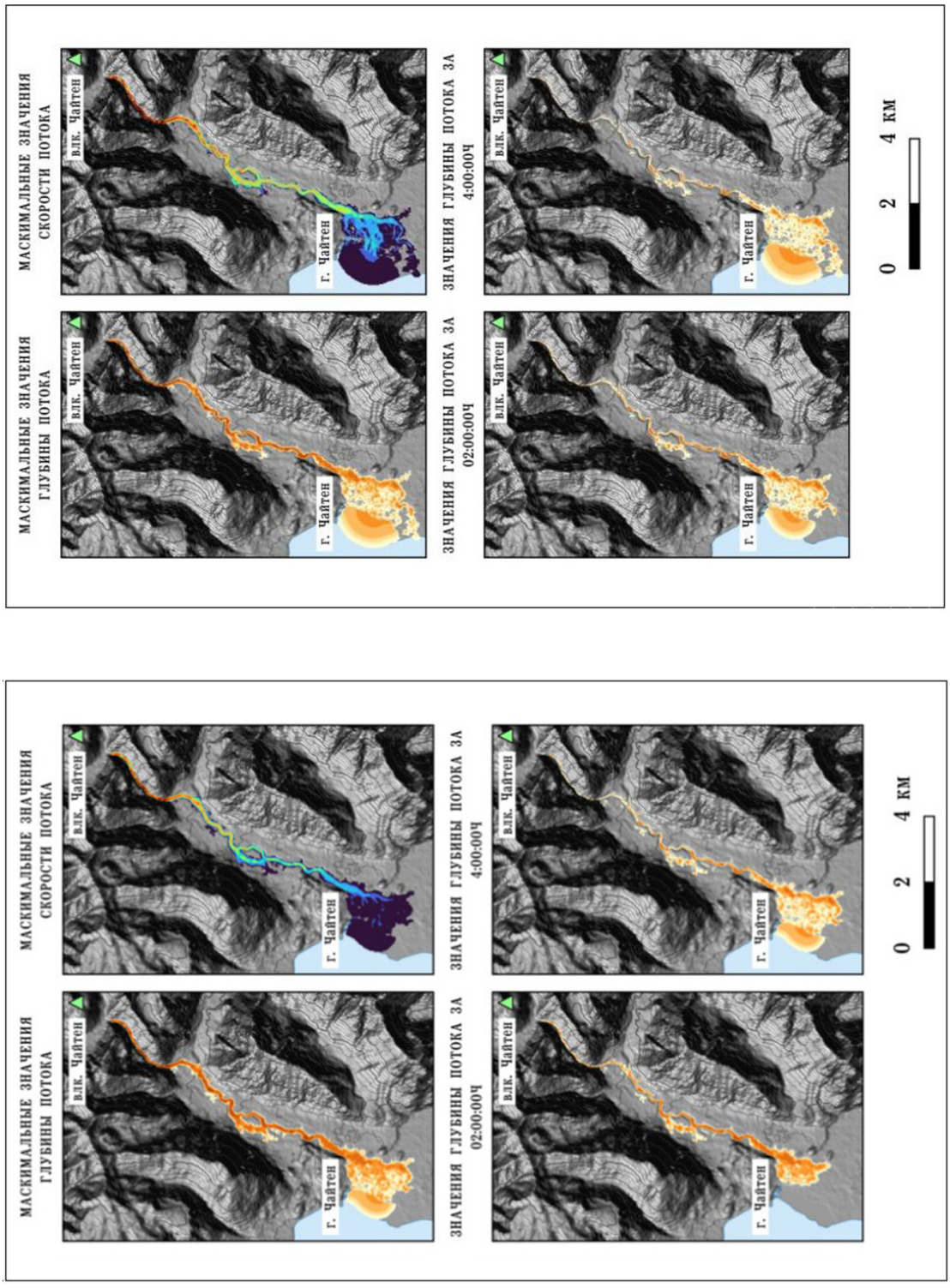
$$CS = TP \cdot ((1 - FP)^{1/2}) \cdot ((1 - FN)^2) \cdot 100.$$

Этот балл использует все 3 индекса (*TP*, *FP*, *FN*), каждый из которых важен для общего сравнения смоделированного лахара с настоящим. Когда смоделированная область полностью соответствует реальной, композитный балл равен 100 (т. е. $TP = 1$, FP и $FN = 0$). Когда она полностью не соответствует фактическому потоку, композитный балл равен 0 (т. е. $TP = 0$ и $FP + + FN = 1$) [12].

На основании расчёта взвешенного композитного балла стало очевидна большая эффективность модели генерализованной жидкости Гершеля – Балкли (33 балла, тогда как для модели Бингамовской жидкости – 22) (рис. 2).

Кроме вышеуказанных показателей, для чистоты выбора наиболее подходящей модели также были рассчитаны и сравнены такие показатели, как охват заполненной территории (Ω_{Tm}), нормализованная сумма переоценок (Δ_{o}) и недооценок (Δ_{u}), а также кумулятивная метрика (C_m) [13] (табл. 1).

Из табл. 1 и рис. 2 очевидно, что модель на основе генерализованной жидкости Гершеля – Балкли обеспечивает более точное совпадение с реальными данными. Это подтверждается результатами вычислений 6 из 8 метрик: *TP*, *FN*, CompositeScore, Ω_{Tm}, Δ_{o} и C_m.



а *б*

Рис. 1. Модели потоков лахара методами Бингамовской жидкости (*а*) и генерализованной жидкости Гершеля – Балкли (*б*) (цвет онлайн)

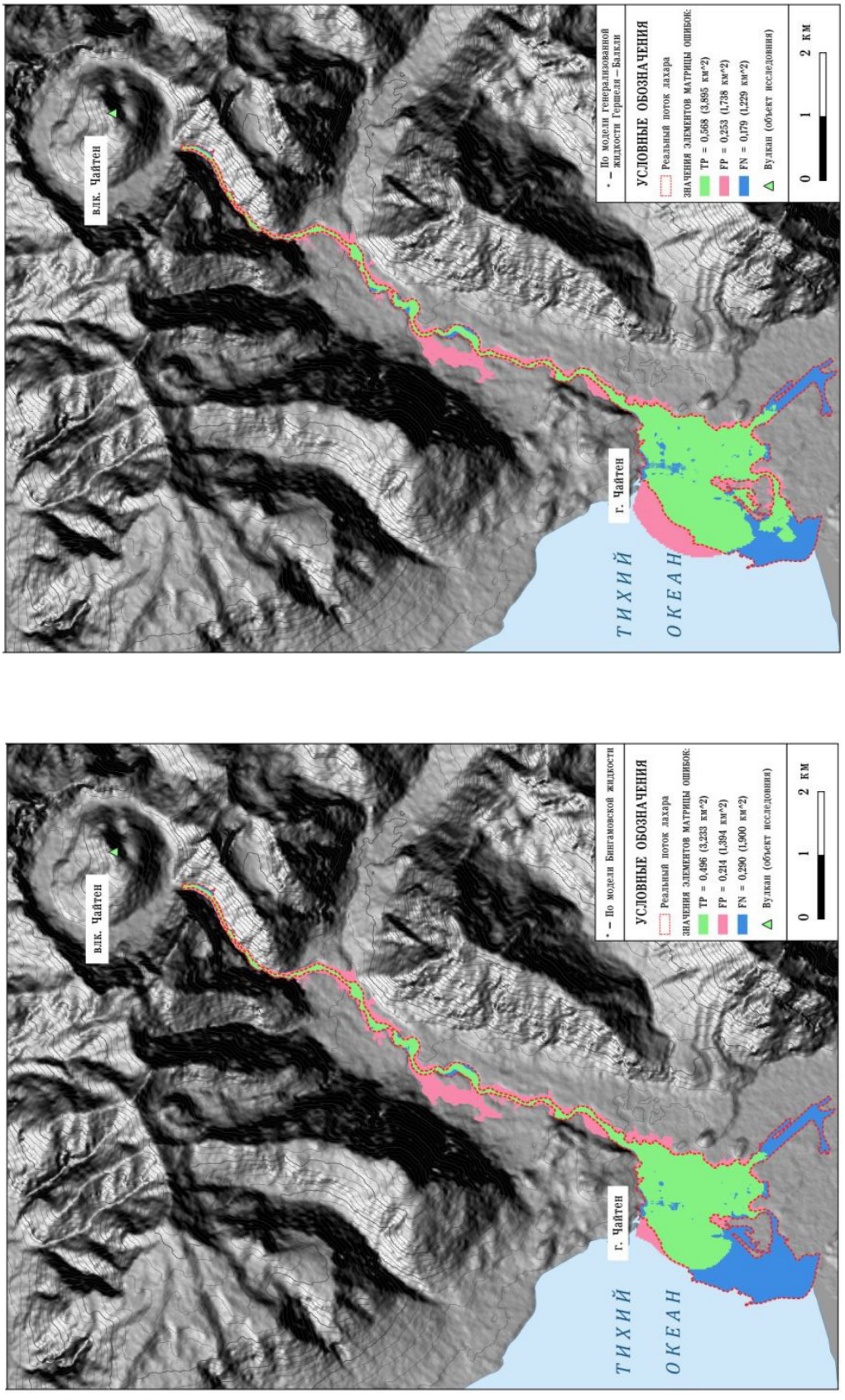


Рис. 2. Значения элементов матрицы по смоделированному потоку лахара по моделям Бингамовской жидкости (*а*) и генерализованной жидкости Герщеля – Балкли (*б*) (цвет онлайн)

Дальнейшие расчёты потенциального ущерба инфраструктуры проводились на базе модели генерализованной жидкости Гершеля – Балкли.

Таблица 1

Сравнительная таблица двух смоделированных потоков моделями Бингамовской жидкости и генерализованной жидкости Гершеля – Балкли

Метрика	Метод	
	Бингам	Гершеля – Балкли
$TP_{\text{truepositive}}$	0.496	0.568
$FP_{\text{falsepositive}}$	0.214	0.253
$FN_{\text{falsenegative}}$	0.290	0.179
CompositeScore	22	33
Ω_{Tm}	0.504	0.432
Δ_{o}	0.343	0.717
Δ_{u}	0.298	0.151
C_m	0.377	0.469

Общее число зданий, располагающихся в городской черте, – 375, среди которых:
- 28 – высота затопления менее 0.30 м;
- 45 – высота затопления от 0.30 до 0.75 м;
- 88 – высота затопления от 0.75 до 1.50 м;
- 156 – высота затопления более 1.50 м;
- 62 – не подверглись воздействию смоделированного потока.

По оценкам специалистов, в действительности около 90% всех построек города были под воздействием потока [8]. Под потенциальной угрозой затопления модели оказалось 83.5% зданий – 313 единиц. Разница между действительным и смоделированным потоком составила 6.5%.

Методом доверительных отношений для частот и долей по Аврааму Вальду доверительный интервал для реального события составил от 86.96 до 93.04%, тогда как для модели – от 79.74 до 87.26% [14]. Перекрытие интервалов в районе 87% указывает на совместимость модели с реальностью. Данный результат показывает, что модель достаточно хорошо предсказывает зоны воздействия на постройки (рис. 3).

Рассмотренный ранее сценарий проводил моделирование ситуации, при которой лахар перемещается по рельефу без инженерных преград, что позволило оценить потенциальный ущерб в наихудшем случае. Однако во многих вулканических районах применяются защитные сооружения, способные замедлять и перенаправлять потоки, ограничивая их воздействие [15]. На рис. 4 представлен сценарий, показывающий распространение смоделированного потока с добавлением сдерживающих барьеров.

Обратимся к рис. 5, чтобы провести подсчёт зданий, оказавшихся под потенциальной угрозой затопления модели.

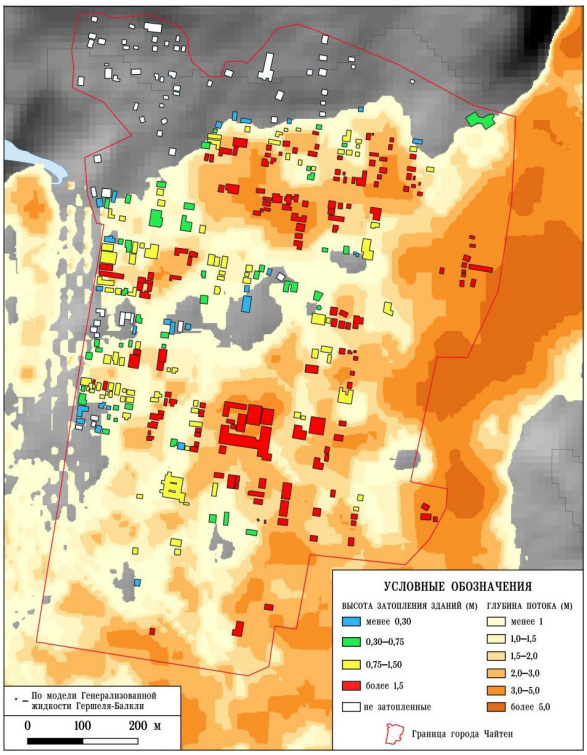


Рис. 3. Карта затопления г. Чайтен лахаром по модели генерализованной жидкости Гершеля – Балкли (цвет онлайн)

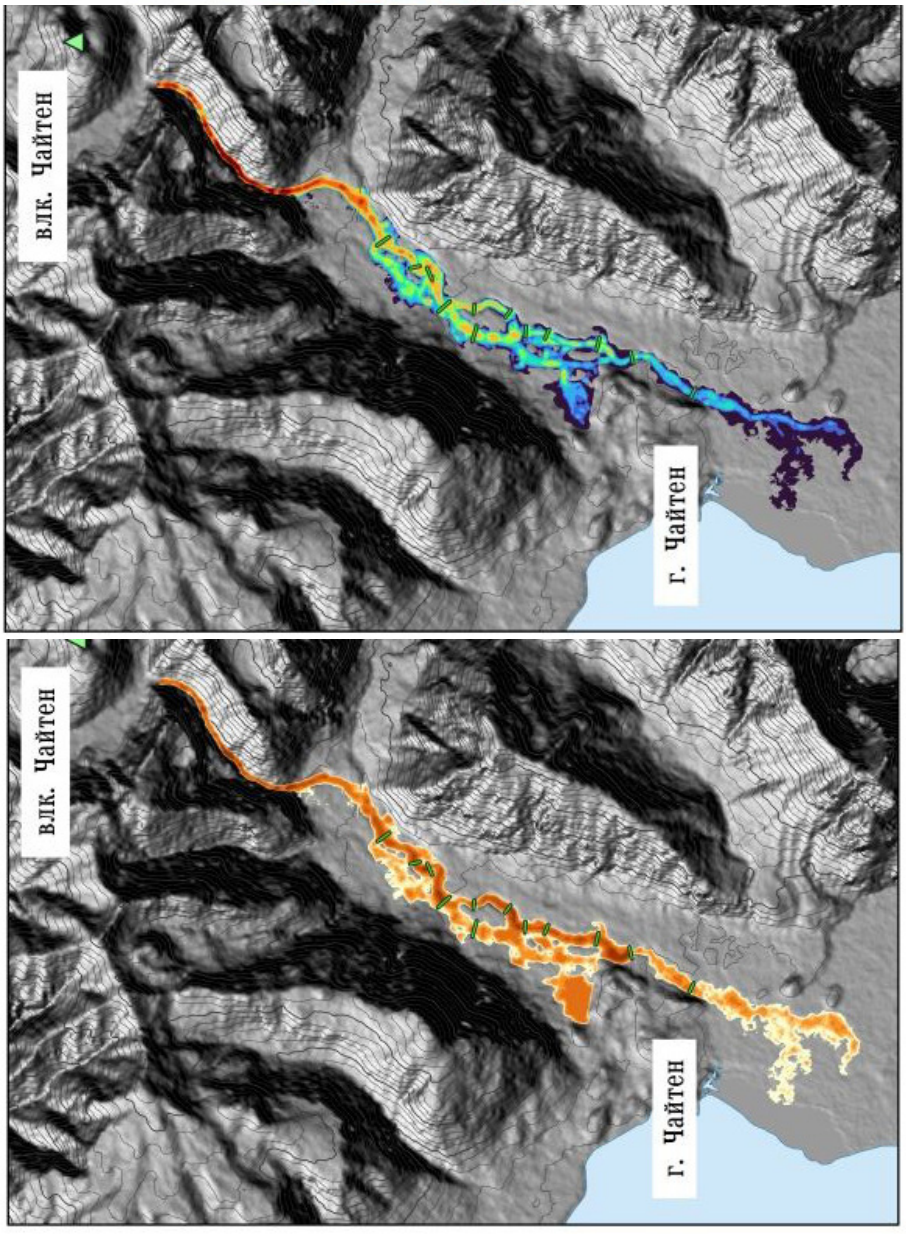
Общее число зданий, входящих на территорию города, – 375, среди которых:
- 9 – затоплено от 0 до 0.30 м;
- 7 – затоплено от 0.30 до 0.75 м;
- 9 – затоплено от 0.75 до 1.50 м;
- 9 – затоплено от 1.50 м;
- 341– не подверглись воздействию смоделированного потока.

Под потенциальной угрозой затопления модели оказалось 9% зданий – 34 единицы.

Таблица 2

Сравнительная таблица двух сценариев затопления города потоком без учёта и с учётом защитных сооружений

Воздействие лахара на здания	Количество зданий	
	без барьеров	с барьерами
Затопление от 0 до 0.30 м	28	9
Затопление от 0.30 до 0.75 м	45	7
Затопление от 0.75 до 1.50 м	88	9
Затопление от 1.50 м	156	9
Не подверглись воздействию	62	341
Процент от общего числа	83.5	9



а *б*

Рис. 4. Смоделированный поток лахара с использованием защитных сооружений: *а* – максимальные значения глубины потока, *б* – максимальные значения скорости потока (цвет онлайн)

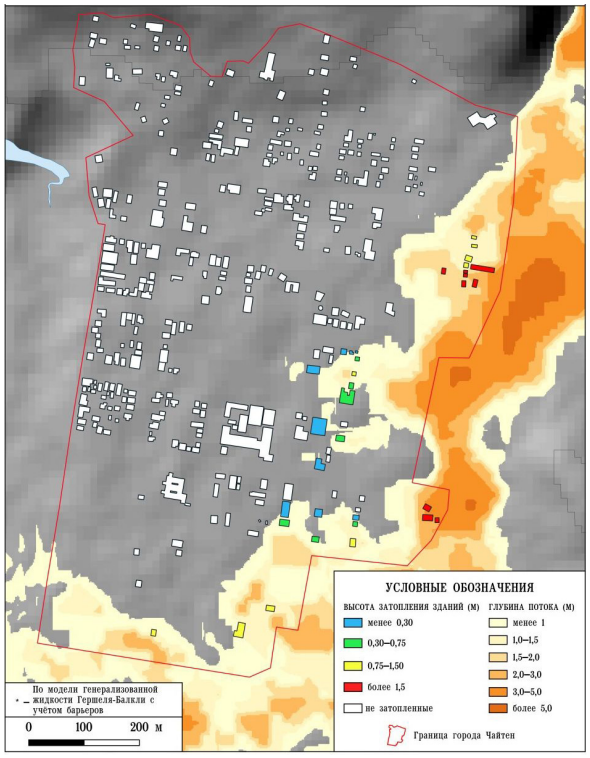


Рис. 5. Карта затопления г. Чайтен лахаром с использованием защитных сооружений по модели генерализованной жидкости Гершеля – Балкли (цвет онлайн)

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.

Выводы

Изучение и имитационное моделирование вулканической деятельности играют ключевую роль в понимании механизмов извержений и разработке мер защиты населения и окружающей среды.

Применение современных технологий для проведения камерального моделирования потоков лахара доказало эффективность использования реологических моделей с последующим определением мест установки защитных сооружений, что, в свою очередь, способно оказать значительное влияние на прогнозируемые характеристики лахаров, такие как глубина и скорость потока. Результаты исследования подчёркивают значимость моделирования для прогнозирования вулканических извержений и разработки стратегий минимизации их последствий.

Модель применима для прогнозирования лахаров на других андийских вулканах (Чили, Эквадор, Колумбия) со схожими условиями. Для успешного применения модели необходимы следующие входные данные: цифровая модель рельефа высокого разрешения (≤ 10 м) для точного задания морфологии русел, параметры лахарового потока. В результате моделирования получаются следующие ключевые выходные данные: пространственное распределение потока с глубинами и скоростями потока; метрики точности модели; количество и расположение зданий, попадающих в зону затопления, с классификацией по глубине затопления.

Библиографический список

1. *Черкашина Р. И., Муравьева Я. Д., Дубровская И. К.* Сейсмический фактор в активизации эндогенно-экзогенных процессов на вулкане Ключевской (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2020. № 2. С. 55–68. https://doi.org/10.31857/S0203030620020029, EDN: QLYTWP
2. *Чалов С. Р., Цыпленков А. С., Школьный Д. И., Прокопьева К. Н., Бахарева Е. И.* К оценке возможного влияния материкового стока на гибель гидробионтов в Авачинском заливе Тихого океана (Камчатка) // Известия Русского географического общества. 2022. Т. 154, № 4. С. 69–84. https://doi.org/10.31857/S0869607122040048, EDN: YNPFBT
3. *Warwick R., Williams-Jones G., Kelman M., Witter J.* A scenario-based volcanic hazard assessment for the Mount Meager Volcanic Complex, British Columbia // Journal of Applied Volcanology. 2022. Vol. 11. Art. 5. https://doi.org/10.1186/s13617-022-00114-1, EDN: LYAICN
4. Estudio del Impacto Territorial – Ambiental Generadopor la Erupción del Volcán Chaitén. URL: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/100349/0431_aq-gonzalez_ma.pdf?sequence=3&isAllowed=y (дата обращения: 26.03.2025).
5. HEC-RAS: Its history, benefits, drawbacks, and alternatives. URL: https://www.autodesk.com/blogs/water/2023/10/25/hec-ras-its-history-benefits-drawbacks-and-alternatives/ (дата обращения: 26.03.2025).
6. HEC-RAS: Non-Newtonian Methods URL: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasmuddebris/non-newtonian-user-s-manual/non-newtonian-transport-editor/non-newtonian-methods (дата обращения: 26.03.2025).
7. *Gibson S., Floyd I., Sánchez A., Heath R.* Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS // Earth Surface Processes. 2020. Vol. 46, iss. 3. P. 540–553. https://doi.org/10.1002/esp.5044, EDN: MLYGFA
8. *Pierson T., Major J., Amigo Á., Moreno H.* Acute sedimentation response to rainfall following the explosive

phase of the 2008–2009 eruption of Chaitén volcano, Chile // Bulletin of Volcanology. 2013. Vol. 75. P. 5075–5094. https://doi.org/10.1007/s00445-013-0723-4, EDN: DXVUGL

9. Chaiten Volcano, Chile. URL: https://earthobservatory.nasa.gov/images/37348/chaiten-volcano-chile (дата обращения: 27.03.2025).
10. ASF Data Search – University of Alyaska System. URL: https://search.asf.alaska.edu/#/ (дата обращения: 26.03.2025).
11. *Mossoux S., Saey M., Bartolini S., Poppe S., Canters S., Kervyn M.* Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows // Computers & Geosciences. 2016. Vol. 97. P. 98–109. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.09.003, EDN: XZLAPP
12. Q-LAVHA 3.0: MANUAL. URL: https://fard.research.vub.be/sites/default/files/2023-09/Usersguide_Q-LavHA_V3_2020.pdf (дата обращения: 26.03.2025).
13. *Barnhart K. R., Jones R. P., George D. L., McArdell B. W., Rengers F. K., Staley D. M., Kean J. W.* Multi-Model Comparison of Computed Debris Flow Runout for the 9 January 2018 Montecito, California Post-Wildfire Event // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2021. Vol. 126, iss. 12. P. 1464–1484. https://doi.org/10.1029/2021JF006245, EDN: QVTZHJ
14. *Гржибовский А. М.* Доверительные интервалы для частот и долей // Экология человека. 2008. № 5. С. 57–60. EDN: IJTRKV
15. Risk reduction by mitigation structures – Change of the paradigm in risk assessment of volcanic lahar flows of the Cotopaxi volcano in Ecuador. URL: https://www.researchgate.net/publication/351284395_Risk_reduction_by_mitigation_structures_-Change_of_the_paradigm_in_risk_assessment_of_volcanic_lahar_flows_of_the_Cotopaxi_volcano_in_Ecuador (дата обращения: 26.03.2025).

Поступила в редакцию 17.05.2025; одобрена после рецензирования 26.05.2025;
принята к публикации 29.05.2025; опубликована 30.09.2025

The article was submitted 17.05.2025; approved after reviewing 26.05.2025;
accepted for publication 29.05.2025; published 30.09.2025