

Численное моделирование катастрофических селей, обвалов и оползней с применением трехмерной дискретной модели

Numerical modeling of catastrophic debris flows, rock avalanches and landslides using a discrete three-dimensional model

ЧЕРНОМОРЕЦ С.С.

Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.н, Москва, devdorak@gmail.com

МИХАЙЛОВ В.О.

Инженер научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей и аспирант географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, vladg27@rambler.ru

CHERNOMORETS S.S.

A senior scientist of the Research Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows of the faculty of geography of M.V. Lomonosov Moscow State University, Ph.D. (Geography), Moscow, devdorak@gmail.com

MIKHAILOV V.O.

An engineer of the Research Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows and a postgraduate student of the faculty of geography of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, vladg27@rambler.ru

Ключевые слова: моделирование; обвал; селя; оползень; опасные природные процессы; природные катастрофы; река Герхожан-Су; ледник Колка; гора Уаскаран; оползень-обвал Игун; Атабадский обвал.

Аннотация: в статье рассматриваются результаты моделирования крупных катастрофических селей, обвалов и оползней с применением трехмерной дискретной модели DEBRIS, разработанной В.О. Михайловым. Рассматривается моделирование селя, сошедшего по реке Герхожан-Су (2000 г., Центральный Кавказ), схода ледника Колка (2002 г., Центральный Кавказ), Уаскаранской катастрофы (1970 г., Перуанские Анды), обвала-оползня Игун (2000 г., Тибет) и Атабадского обвала (2010 г., горная система Каракорум).

Key words: modeling; rock avalanche; debris flow; landslide; hazardous natural processes; natural disasters; Gerkhozhan-Su River; Kolka Glacier; Mt. Huascaran; Yigong rock avalanche; Attabad rock avalanche.

Abstract: the article describes the simulation results of some large catastrophic debris flows, rock avalanches and landslides using the DEBRIS 3D model developed by V.O. Mikhailov. The authors consider modeling of the debris flow on the Gerkhozhan-Su River (the Central Caucasus, 2000), the collapse of Kolka Glacier (the Central Caucasus, 2002), the Huascaran catastrophe (the Peruvian Andes, 1970), the Yigong rock avalanche (Tibet, 2000) and the Attabad rock avalanche (Karakoram, 2010).

Введение

Катастрофические сели, обвалы и оползни являются опасными явлениями в горных районах, приводящими подчас к серьезным разрушениям и человеческим жертвам. Для осуществления мероприятий по предотвращению или смягчению их последствий необходимо проведение комплексных исследований условий, факторов и предпосылок их возникновения и прохождения.

Для исследования селевых, обвальных и оползневых процессов применяются различные методы, основными из которых являются реальные наблюдения — полевые исследования и дешифрирование аэрофотоснимков, а также моделирование — численное и экспериментальное.

Реальные наблюдения дают значительное количество информации об уже произошедшем или прогнозируемом катастрофическом событии. Например, после схода катастрофического селя, обвала или оползня можно определить границы зоны катастрофы, гранулометрический, петрографический состав и объем вовлеченного в движение материала, характеристики потока вещества, форму ложа потока.

Экспериментальное моделирование, в свою очередь, позволяет определять характеристики произошедше-

го катастрофического события, которые затруднительно узнать путем реальных наблюдений: скорость движения и расход вещества, силу давления на препятствие, силу сухого и вязкого трения и время движения потока. Однако трудности здесь возникают при соотношении модельных и реальных характеристик. Кроме того, построение экспериментальной установки для описания катастрофического события является технически сложным, а в некоторых случаях невозможным.

Численное, или математическое, моделирование применимо для определения широкого спектра характеристик процессов различного типа и генезиса, в том числе и тех, для которых экспериментальное моделирование осуществить затруднительно. Здесь не требуется построение экспериментальной установки, а также приведение модельных характеристик к реальным с использованием коэффициентов подобия. Численное моделирование является одним из важных и необходимых инструментов, используемых при проведении защитных мероприятий, а также при прогнозе параметров и зон охвата катастрофических селей, обвалов и оползней.

Следует отметить, что моделирование и реальные наблюдения тесно взаимосвязаны и наилучшая оценка

параметров уже произошедшего события может быть проведена путем совместного использования обоих методов. В настоящее время существуют различные модели движения обвалов, оползней и селей, имеющие специфические области применения [3].

Основной целью представленного в настоящей статье исследования являлось использование численного моделирования для определения характеристик некоторых уже произошедших катастрофических проявлений селевых и склоновых процессов на Центральном Кавказе, в Перуанских Андах, на Тибете и в горной системе Каракорум. В ходе исследования была построена авторская математическая модель [5], с помощью которой было проведено изучение пяти катастрофических событий в указанных регионах. На основании полученных результатов в статье обсуждаются принципы работы, результаты реализации и пути дальнейшего совершенствования данной модели.

Модель DEBRIS

Модель движения обвальных масс DEBRIS (Digital Elementary Balls and Relief Interaction Simulation, то есть цифровая модель взаимодействия элементарных сферических частиц и поверхности) была разработана В.О. Михайловым с использованием метода дискретных элементов [5]. Она основана на численном решении дифференциального уравнения движения материальной точки, составленного в соответствии со вторым законом Ньютона. Движение в таком случае описывается траекториями движения центров масс обломков. Ложе потока соответствует поверхности цифровой триангуляционной модели рельефа. Частицы потока имеют одинаковый размер, шарообразную форму и рассматриваются в качестве материальных точек. При движении частицы упруго взаимодействуют между собой, а также с поверхностью ложа, испытывая при этом влияние трения. В связи с рас-

смотрением обломков породы в качестве материальных точек в модели не отражается процесс вращения обломков. При этом под трением подразумевается трение качения.

Если образно представить работу модели, то движение обвала в ней имитируется движением потока частиц в форме горошин в лотке, форма которого соответствует рельефу выбранной территории. Горошины упруго соударяются между собой, а также со стенками подложки, испытывая при этом влияние трения. Их физические характеристики соответствуют характеристикам обломков пород, а физические свойства лотка — свойствам ложа потока.

В отличие от большого количества математических моделей обвалов, оползней и селей, относящихся к непрерывным моделям и клеточным автоматам, DEBRIS является дискретной [4]. Ее ближайшим коммерческим аналогом является модель PFC-3D/UDEC/3DEC [16, 19]. При этом отличие состоит в том, что в модели DEBRIS движение обломков или жидкости имитируется движением условных частиц — материальных точек — под влиянием специфически вычисляемых сил упругости и трения, а PFC-3D описывает поведение реальных обломков заданной формы, движущихся как твердые тела под действием поверхностных напряжений, а также моментов данных сил.

Реализация модели

С использованием разработанной модели DEBRIS было проведено моделирование склоновых и селевых процессов на выбранных участках Центрального Кавказа, Перуанских Анд, Тибета и Каракорума (рис. 1):

- 1) для бассейна реки Герхожан-Су (Кабардино-Балкария) был смоделирован катастрофический грязекаменный сел в городе Тырнаузе в июле 2000 года;
- 2) для бассейна реки Геналдон (Северная Осетия) было проведено моделирование катастрофического схода ледника Колка в Кармадонскую котловину в виде водно-ледово-каменного потока 20 сентября 2002 года;
- 3) для бассейна реки Ранраирка (Перу) был смоделирован катастрофический обвал с горы Уаскаран, трансформировавшийся в ходе движения в водно-ледово-каменный сел, сошедший на город Юнгай 31 мая 1970 года;
- 4) для бассейна реки Чжаму (Китай) было выполнено моделирование катастрофического обвала-оползня Игун 9 апреля 2000 года;
- 5) для бассейна реки Хунза (Пакистан) было проведено моделирование Аттабадского обвала 4 января 2010 года.



Рис. 1. Территориальное положение моделируемых катастрофических событий: 1 — сел на реке Герхожан-Су (2000 г., Центральный Кавказ); 2 — сход ледника Колка (2002 г., Центральный Кавказ); 3 — Уаскаранская катастрофа (1970 г., Перуанские Анды); 4 — обвал-оползень Игун (2000 г., Тибет); 5 — Аттабадский обвал (2010 год, Каракорум)



Рис. 2. Селевой врез в долине реки Герхожан-Су после схода селей 18–25 июля 2000 г. (фото С.С. Черноморца)



Рис. 3. Последствия схода селей 18–25 июля 2000 г. в городе Тырнаузе (фото С.С. Черноморца)



Рис. 4. Результаты моделирования схода селя в бассейне реки Герхожан-Су с помощью модели DEBRIS. Черным цветом показаны частицы, имитирующие обломки породы; серым цветом показан след движения частиц; горизонталы проведены через 100 м; черной стрелкой показано направление движения потока вещества

Выбор указанных участков был обусловлен, во-первых, достаточным количеством относящегося к ним фактического материала. В частности, на трех из них авторами до начала моделирования были проведены детальные полевые исследования. Во-вторых, смоделированные склоновые и селевые процессы в пределах указанных участков различны как по свойствам и параметрам, так и по генезису, что необходимо для наиболее надежной проверки работы модели DEBRIS.

Сель 2000 года на реке Герхожан-Су

Катастрофический сель, сошедший по реке Герхожан-Су (Кабардино-Балкария, Центральный Кавказ), продолжался в виде серии волн с 18 по 25 июля 2000 года. Его причиной послужила аномально теплая погода, наблюдавшаяся в течение 10 дней до катастрофы и вызвавшая интенсивное таяние ледников Западный и Восточный Каяарты [9]. Ливни не оказали влияния на формирование селя [5]. Он возник вследствие прорыва небольшого озера у края ледника Западный Каяарты на высоте около 3400 м, сформировавшегося при закупорке приледникового канала [9]. Далее сель прошел вниз по долине рек Каяарты-Су и Герхожан-Су, интенсивно вовлекая в движение рыхлые толщи, особенно в пределах крупного оползня Бузулган [3]. Он сформировал глубокие каньоны в русле реки (рис. 2) и отложил материал при впадении в реку Баксан в пределах города Тырнауза на высотах 1200–1300 м (рис. 3), после чего трансформировался

в наносоводный паводок на реке Баксан. Глубина селя в каньоне выше оползня Бузулган достигала 20 м и более при ширине почти 50 м. Его скорость в пределах селепропускного лотка в г. Тырныаузе достигала 8–12 м/с [9]. В результате катастрофы погибло 8 человек, было разрушено несколько домов и затоплена значительная часть города в результате образования подпрудного озера при перекрытии селевыми массами реки Баксан. Суммарный объем отложений селя оценивается примерно в 3 млн м³ [2]. Время добегания его волны от края ледника Западный Каяарты до г. Тырныауза оценивается примерно в 15–20 мин. на дистанции 12 км [9].

При моделировании схода этого потока по долине реки Герхожан-Су на г. Тырныауз был выбран сценарий схода селя, вовлекающего в движение рыхлый материал ложа. В модели была использована построенная цифровая модель рельефа бассейна реки Герхожан-Су. В месте зарождения и по ходу предполагаемого движения селя были автоматически размещены частицы рыхлых толщ, вовлеченных селом в движение. При заполнении указанных пространств для данных частиц были заданы физические свойства, соответствующие усред-



Рис. 5. Верхняя часть зоны катастрофы: участок начального движения ледника Колка (фото И.В. Галушкина, 25 сентября 2002 г.)

ненным свойствам вещества селевого потока. Для частиц были заданы следующие параметры: радиус $R = 1$ м, плотность $\rho = 2000$ кг/м³, коэффициент (угол) сухого трения $\mu = 0$, коэффициент вязкого трения $\eta = 3,3$ Па·с², коэффициент упругости (модуль Юн-

га) $k = 0,2$ ГПа. Начальная скорость частиц принималась равной 0 м/с. Исходя из общего количества автоматически «созданных» частиц (484 шт.) и вычисленного объема каждой из них (4,1 м³) общий объем материала, вовлеченного в движение одной волной селево-



Рис. 6. Отложения ледово-каменного потока в Кармадонской котловине (фото А.П. Полкового, 22 сентября 2002 г.)

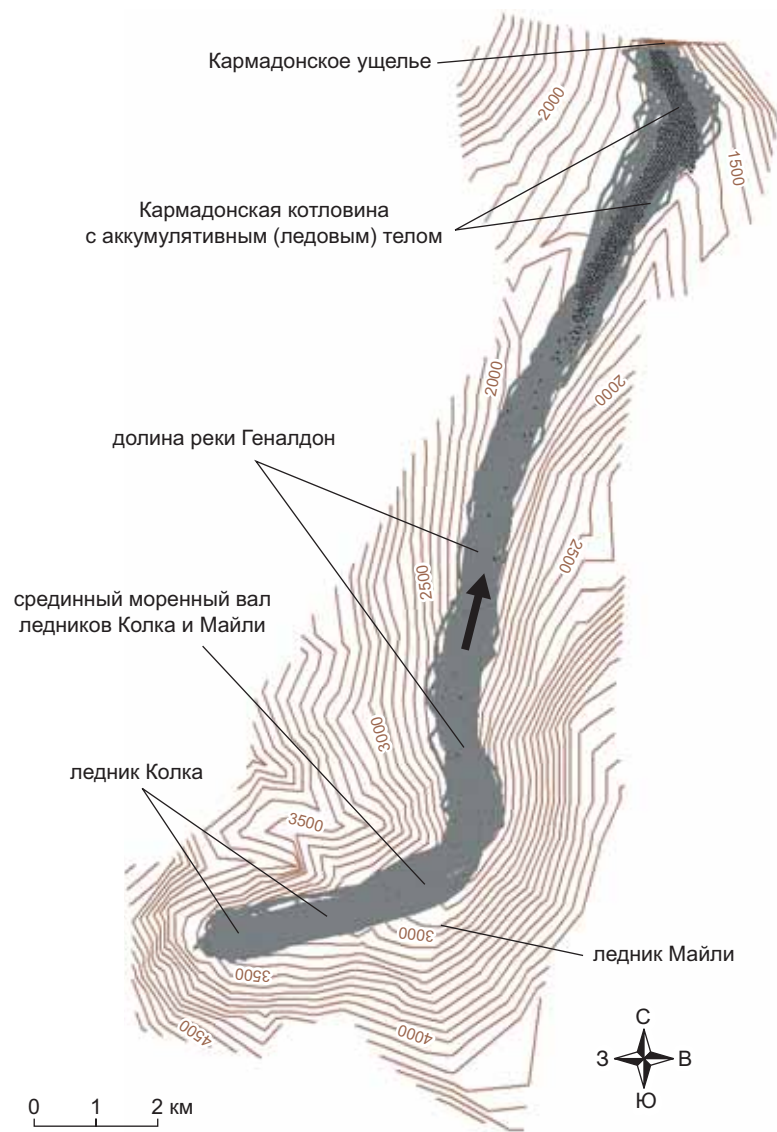


Рис. 7. Результаты моделирования схода ледника Колка в бассейне реки Геналдон с помощью модели DEBRIS. Черным цветом показаны частицы, имитирующие обломки породы; серым цветом показан след движения частиц; горизонтали проведены через 100 м; черной стрелкой показано направление движения потока вещества



Рис. 8. Район Уаскаранской катастрофы: разрушенные город Юнгай и поселок Ранраирка. Аэрофотоснимок сделан военными летчиками США 14 июля 1970 г. в ходе выполнения проекта по оказанию гуманитарной помощи правительству Перу (фото из архива USGS)

го потока, составил 438 тыс. м³. Объем вещества начальной стадии потока (40 шт.) был принят равным 36 тыс. м³.

Движение селевого потока, имитируемое в модели DEBRIS движением частиц, визуализируется в различные моменты времени T (рис. 4). К моменту $T = 140$ с поток последовательно прошел три пологие задровые площадки ниже ледника, получил подпитку в западном каньоне р. Каяарты-Су, распластался на поле аккумуляции и вышел к так называемому Верхнему ущелью Каяарты-Су. Далее, к моменту $T = 280$ с сель прошел Верхнее ущелье и дошел до среднего течения долины реки Каяарты-Су, получив подпитку рыхлым материалом. К моменту $T = 420$ с поток прошел Нижнее ущелье Каяарты-Су и вышел к устью реки Сакашили-Су, вобрав в себя значительное количество рыхлых отложений, имитируемых в модели частицами. К моменту $T = 560$ с сель преодолел район оползня Бузулган и вышел к разрушенной плотине-селеуловителю, также вовлекая в себя рыхлые толщи. Наконец, к моменту времени $T = 730$ с поток вошел в г. Тырнауз, частично перелестнул через стенки селепропускного лотка и распластался на конусе выноса, круто повернув направо при впадении в реку Баксан и достигнув ее противоположного борта.

Таким образом, в результате моделирования были получены следующие результаты, в общих чертах соответствующие данным полевым исследований [3, 9]. Общий период движения волны селевого потока от края ледника Западный Каяарты до реки Баксан составил около 750 с (около 13 мин.). Установленная в модели скорость движения фронтальной части селевого потока в среднем была равна 8–14 м/с. Установленная глубина селевого потока составляла около 5–15 м в каньонах и менее 5–10 м на поле аккумуляции и на конусе выноса, в том числе и в селепропускном лотке. Объем отложений волны селевого потока на конусе выноса был определен в модели как суммарный объем остановившихся на конусе выноса частиц. Их объем, таким образом, составил примерно 400 тыс. м³.

Сход ледника Колка 2002 года

Катастрофический сход ледника Колка в Кармадонскую котловину по долине реки Геналдон (Северная Осетия, Центральный Кавказ) произошел 20 сентября 2002 года. В настоящее время существуют различные версии, касающиеся причин и сценария этого события [1, 7–9, 14]. По-видимому, непосредственным поводом для катастрофы послужил избыток давления на поверхность ледника Колка материалов, отложенных в результате каменно-ледовых обвалов с северо-восточного склона горы Джигарай-хох (с

абсолютных высот 4100–4500 м) в августе–сентябре 2002 года [8, 9]. Общий объем этих обвальных масс, накопившихся в течение двух месяцев, предшествовавших катастрофе, оценивается примерно в 20–27 млн м³, из которых примерно по 10–15 млн м³ приходятся соответственно на лед и породу [14]. В результате большая часть лед-

ника Колка с высот 2800–3200 м устремилась вниз по долине реки Геналдон в виде ледово-каменного потока (рис. 5). Объем перемещенной части ледника мощностью до 100 м, шириной до 700 м и протяженностью до 2,5 км оценивается примерно в 80–90 млн м³ [7]. Этот поток перекрестил через срединный моренный вал ледников Майли и

Колка, переместился по краю ледника Майли и далее пошел вниз по долине реки Геналдон, совершая заплески на ее бортах высотой до 150 м. Ширина потока достигала 400–500 м. Его скорость в долине оценивается примерно в 60–80 м/с [14]. Далее поток прошел Кармадонскую котловину (рис. 6) и был остановлен на узком входе в Кармадонское ущелье, отложив большую часть материала в котловине на высотах 1100–1400 м, сформировав ледовое тело.

Время движения ледово-каменного потока от бывшего края ледника Колка до входа в Кармадонское ущелье составило около 6 минут на дистанции 19 км [14]. В само ущелье прошла лишь грязекаменная составляющая потока в виде селя, дошедшего до впадения реки Геналдон в реку Гизельдон в 7,5 км ниже входа в него. В результате катастрофы в котловине был разрушен и погребен поселок Нижний Кармадон. Погибло 125 человек.

Суммарный объем вовлеченного в движение вещества оценивается примерно в 130–140 млн м³ [9, 18]. Объем ледового тела при максимальной мощности 140 м, ширине 600 м и протяженности 3,6 км оценивается в 115 млн м³ [7].



Рис. 9. Глыба из отложений ледово-каменного потока 1970 года в долине реки Ранраирка (фото С.С. Черноморца, 2007 г.)

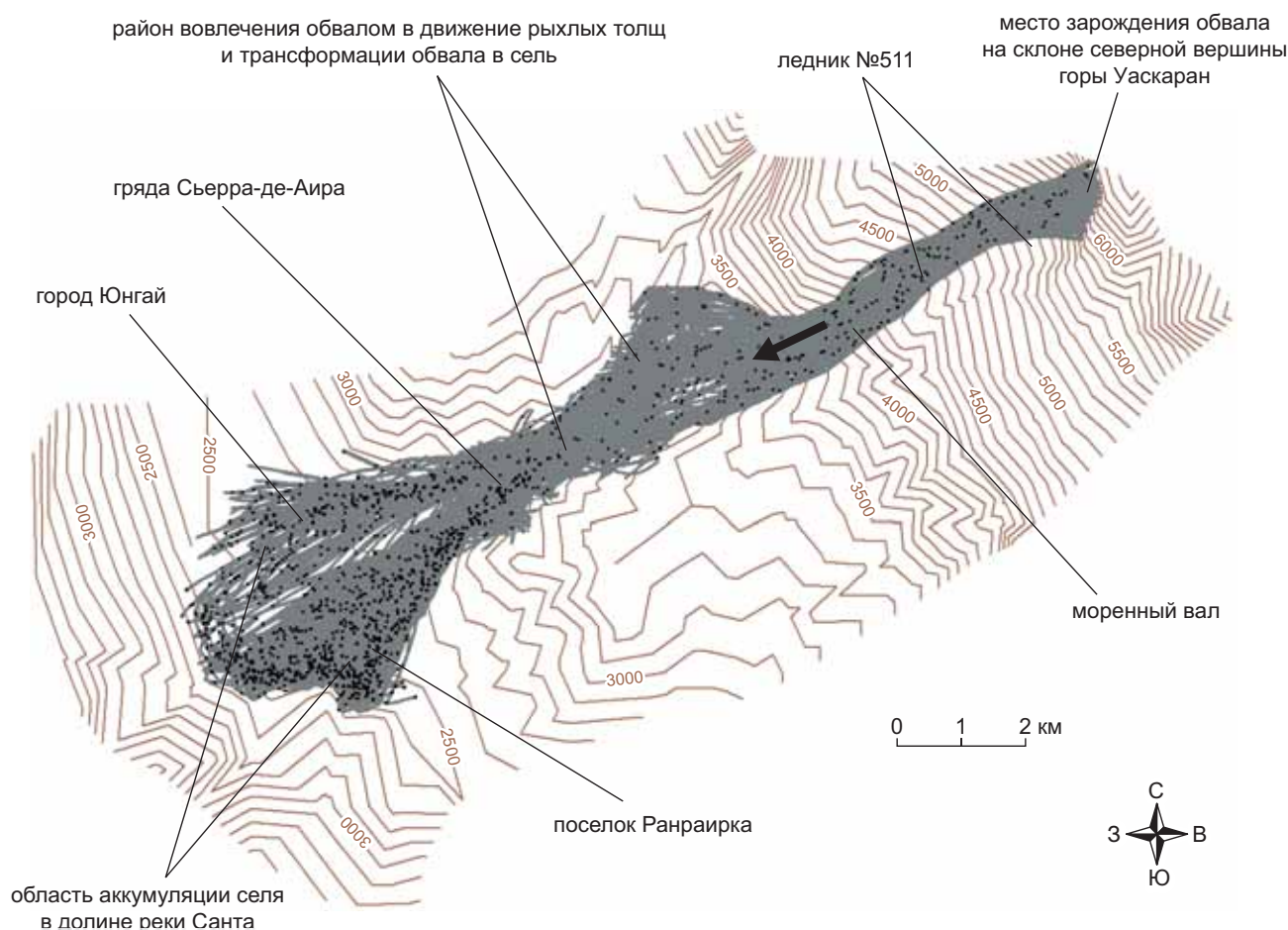


Рис. 10. Результаты моделирования обвала с горы Уаскаран в бассейне реки Ранраирка с помощью модели DEBRIS. Черным цветом показаны частицы, имитирующие обломки породы; серым цветом показан след движения частиц; горизонтали проведены через 100 м; черной стрелкой показано направление движения потока вещества

При моделировании движения ледника Колка был выбран сценарий его схода под действием скопившихся на его поверхности масс, обвалившихся со стены горы Джимарай-хох. В модели была использована построенная авторами цифровая модель рельефа бассейна реки Геналдон. Для составления модели использовалась крупномасштабная топографическая карта. Кроме того, для ключевого участка аккумуляции в верховьях р. Каяарты-Су были использованы данные собственных детальных топографических съемок, проведенных в 2009 г. с помощью дифференциальных GPS-приемников Trimble R3. Затем в модели DEBRIS в котловине бывшего ледника Колка были автоматически размещены частицы ледника и скопившихся на его поверхности обвалных масс. Для частиц обвалных масс были заданы следующие параметры: радиус $R = 10$ м, плотность $\rho = 2500$ кг/м³, коэффициент (угол) сухого трения $\mu = 0,11$, коэффициент вязкого трения $\eta = 0$ Па·с², коэффициент упругости (модуль Юнга) $k = 40$ ГПа. В свою очередь, для частиц, составляющих ледник Колка, были заданы следующие параметры: радиус $R = 10$ м, плотность $\rho = 1000$ кг/м³, коэффициент (угол) сухого трения $\mu = 0,08$, коэффициент вязкого трения $\eta = 0$ Па·с², коэффициент упругости (модуль Юнга) $k = 10$ ГПа. Начальная скорость всех частиц принималась равной 0 м/с. Исходя из общего количества автоматически «созданных» частиц (2732 шт.) и вычисленного объема одной частицы (4,2 тыс. м³) общий объем перемещенного в ходе катастрофы материала был принят равным 140 млн м³. Это примерно соответствует оценкам, полученным в ходе топографических съемок зоны катастрофы [9, 14]. При этом были приняты: объем обвалных масс 20 млн м³ (390 частиц), объем затронутой потоком части ледника Колка 120 млн м³ (2342 частицы).

Движение водно-ледово-каменного потока, имитируемое в модели DEBRIS движением частиц, визуализируется в различные моменты времени T (рис. 7). К моменту $T = 60$ с обвалы массы вместе с частью материала ледника Колка пришли в движение, сформировав водно-ледово-каменный поток. Также отмечается небольшой заплеск потока через левый боковой моренный вал ледника. Далее, к моменту времени $T = 120$ с поток разделился на две части, первая из которых пошла вдоль водотока, вытекающего из ледника Колка, а вторая переклестнула срединный моренный вал ледников Майли и Колка. После этого обе части слились, сформировав крупнейший заплеск на правом борту долины реки Геналдон. К моменту $T = 180$ с поток прошел по долине реки Геналдон до входа в Кармадонскую котловину в районе бывшего поселка Кармадон, сформировав



Рис. 11. Оползень Игун и долина реки Чжаму (фото J. Town, URL: <http://www.flickr.com/photos/16366828@N07/3507459189>)

ровав серию заплесков на бортах долины реки Геналдон. К моменту $T = 240$ с он вошел в Кармадонскую котловину, достигнув поселка Нижний Кармадон. Наконец, к моменту $T = 360$ с поток заполнил Кармадонскую котловину и распластался в ней. Перед входом в Кармадонское ущелье основная его часть была остановлена и отложена в Кармадонской котловине.

Таким образом, в результате моделирования в первом случае были получены следующие результаты, в общих чертах соответствующие данным полевым исследованиям [1, 7, 8, 9, 14]. Общее время движения водно-ледово-каменного потока от стены Джимарай-хох до входа в Кармадонское ущелье составило 210 с (около 3,5 мин.). Установленная в модели скорость движения его фронтальной части составляла в среднем от 60 до 70 м/с. Установленная глубина потока в долине реки Геналдон была равна примерно 100–200 м. Объем его отложений в Кармадонской котловине в модели определен как суммарный объем отложенных в котловине частиц. Таким образом, объем отложений составил примерно 110–120 млн м³.

Уаскаранская катастрофа 1970 года

Катастрофический обвал с западного склона северной вершины горы Уаскаран (Huascarán) в Перуанских Андах произошел 31 мая 1970 года и был спровоцирован сильным землетрясением с магнитудой 7,9 и эпицентром в городе Чимботе. Начальный объем обвалных масс на абсолютных высотах 5600–6400 м оценивался примерно в 7,5 млн м³, из которых 6,5 млн м³ — горные породы, 1,0 млн м³ — лед [13, 20]. После прихода в движение обвалы массы устремились вниз по склону со скоростью до 125 м/с, ударились о поверхность ледника № 511, отложили 2 млн м³ материала на его поверхности и выбили часть ледника [20, 23]. Далее сформированный ледово-каменный

поток вышел в долину реки Ранраирка, стекающей со склона горы Уаскаран, и вовлек в движение рыхлые толщ объемом до 50 млн м³ на территории, лежащей на высотах 2900–3800 м [13]. После этого ледово-каменный поток трансформировался в грязекаменный сель. Суммарный объем вовлеченного материала достиг 58 млн м³. Ниже по течению реки Ранраирка сель разделился на две части (рис. 8). Левая, основная, часть продолжила движение вниз по долине, отложив 48,6 млн м³ материала на выходе в долину реки Санта на высотах 2400–2600 м и уничтожив поселок Ранраирка [13]. Правая часть переклестнула через невысокий хребет Сьерра-де-Аира, вышла в долину реки Санта и полностью разрушила город Юнгай, отложив 3,6 млн м³ [13]. Скорость потока в пределах города Юнгай достигала 52–80 м/с [23]. Поток переносил огромные валуны (рис. 9). В результате катастрофы погибло около 18 тыс. человек. Общее время движения обвала-селя от места его зарождения до города Юнгай составило примерно 4,5 мин. на дистанции 15 км [13]. Далее обе части потока продолжили движение по долине реки Санта, пройдя 180 км в виде наносоводного паводка объемом 6 млн м³ [23].

При моделировании Уаскаранской катастрофы был выбран сценарий схода ледово-каменного обвала с горы Уаскаран, вовлекающего в движение рыхлый материал и трансформирующегося в сель в средней части долины реки Ранраирка с аккумуляцией материала в долине реки Санта. В модели была использована построенная цифровая модель рельефа бассейна реки Ранраирка. В верховьях ее долины на склоне горы Уаскаран были автоматически размещены частицы обвалных масс. В средней части долины были размещены частицы рыхлых толщ, вовлеченных в движение обвалом. Для частиц обвалных масс были заданы следующие параметры: радиус $R = 10$ м, плотность $\rho = 2500$ кг/м³, коэффициент

(угол) сухого трения $\mu = 0,3$, коэффициент вязкого трения $\eta = 0 \text{ Па}\cdot\text{с}^2$ (после начала вовлечения материала $\mu = 0,06$), коэффициент упругости (модуль Юнга) $k = 20 \text{ ГПа}$. В свою очередь, для частиц вовлеченной в движение рыхлой толщи были заданы следующие параметры: радиус $R = 10 \text{ м}$, плотность $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$, коэффициент (угол) сухого трения $\mu = 0,06$, коэффициент вязкого трения $\eta = 1 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$, коэффициент упругости (модуль Юнга) $k = 20 \text{ ГПа}$. Начальная скорость всех частиц принималась равной 0 м/с . Обвальные массы начинают двигаться вниз по склону, распластываясь по расчлененной поверхности после перехлестывания через конечно-моренный вал. При распластывании ледово-каменный поток приводит в движение рыхлую толщу, после чего образованная смесь со специфическими свойствами начинает движение вниз по долине. Исходя из общего количества автоматически «созданных» частиц (2312 шт.) и вычисленного объема одной частицы ($4,2 \text{ тыс. м}^3$) общий объем вовлеченного в движение материала был принят равным 64 млн м^3 . При этом были назначены: объем обвальных масс 18 млн м^3 (684 частицы), объем вовлеченной в движение рыхлой толщи 46 млн м^3 (1628 частиц).

Движение обвальных масс и ледово-каменного, а затем селевого потока, имитируемое в модели DEBRIS движением частиц, визуализируется в различные моменты времени T (рис. 10). К моменту $T = 50 \text{ с}$ обвальные массы ударились о поверхность ледника № 511, прошли по леднику и приблизились к конечному моренному валу в виде ледово-каменного потока. Далее, к моменту $T = 100 \text{ с}$ этот поток перехлестнул через

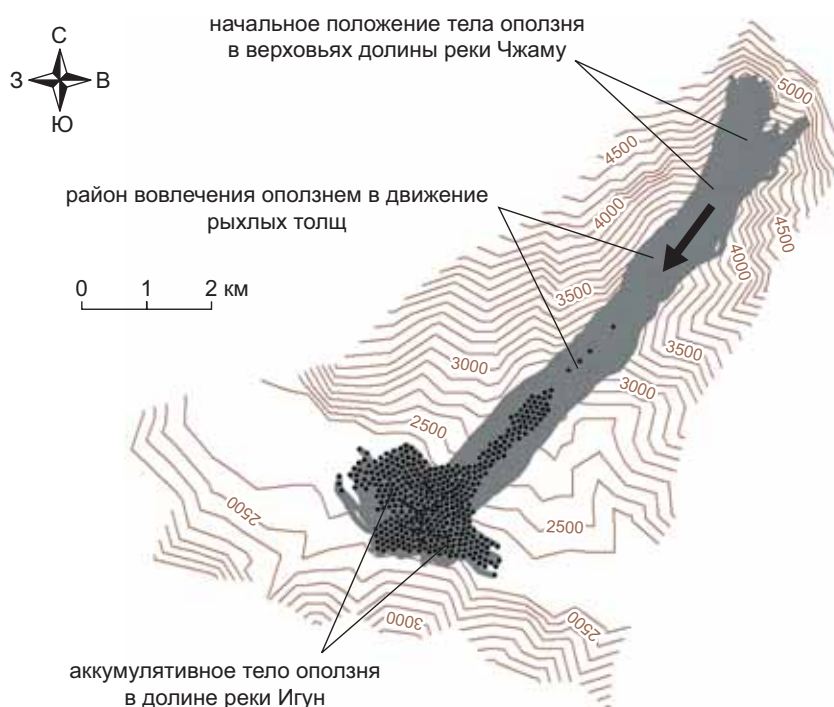


Рис. 12. Результаты моделирования оползня Игун в бассейне реки Чжаму с помощью модели DEBRIS. Черным цветом показаны частицы, имитирующие обломки породы; серым цветом показан след движения частиц; горизонтальны проведены через 100 м; черной стрелкой показано направление движения потока вещества

конечный моренный вал и распластался на обширной поверхности, расчлененной долинами притоков реки Ранраирка, также сформировав заплески по бортам долины. При этом он привел в движение толщ рыхлого материала, локализованные в пределах данной поверхности. К моменту $T = 150 \text{ с}$ поток вовлек в движение рыхлые толщ (также

имитируемые частицами), трансформировавшись в грязекаменный сель, и прошел вниз по долине реки Ранраирка в сужение долины. При этом в момент времени $T = 130 \text{ с}$ работа модели была приостановлена для изменения параметров частиц вещества ледово-каменного потока ввиду его трансформации в селевой поток. Начиная с этого вре-



Рис. 13. Момент схода Аттабадского обвала в долине реки Хунза 4 января 2010 г. (фото Inayat Ali, URL: <http://pamirtimes.net/2010/01/22/how-the-river-blocked>)



Рис. 14. Аккумулятивное тело Аттабадского обвала в долине реки Хунза (фото Pamir Times, URL: <http://pamirtimes.files.wordpress.com/2010/01/dsc06656.jpg>)

мени коэффициент (угол) сухого трения частиц породы μ был принят равным нулю вместо 0,15. Необходимость введения данной поправки связана с наличием смачивания обломков пород (обнуления силы сухого трения) при подпитке потока рыхлым материалом. Это смачивание, по-видимому, сыграло существенную роль в трансформации ледово-каменного потока в селевой, что и отражено в модели. После возобновления работы модели к моменту времени $T = 150$ с на самом выходе из сужения долины также намечилось разделение потока на две части. Правая часть переклестнулась через гряды Сьерра-де-Аира. Левая, основная, часть продолжила движение вниз по долине реки Ранраирка. К моменту $T = 200$ с правая часть потока достигла города Юнгай, левая — поселка Ранраирка. Обе части потока начали распластываться и замедляться в долине реки Санта. Наконец, к моменту $T = 250$ с правая часть прошла через город Юнгай, распласталась и остановилась на подходе к реке Санта. Левая же прошла по всей поверхности конуса выноса, в том числе и через поселок Ранраирка, к реке Санта, захлестнув на ее противоположный борт, после чего направились вниз по долине этой реки.

Таким образом, в результате моделирования были получены следующие результаты, в общих чертах соответствующие данным полевых исследований [13, 20]. Общее время движения обвальных масс, затем ледово-каменного и, наконец, селевого потока от

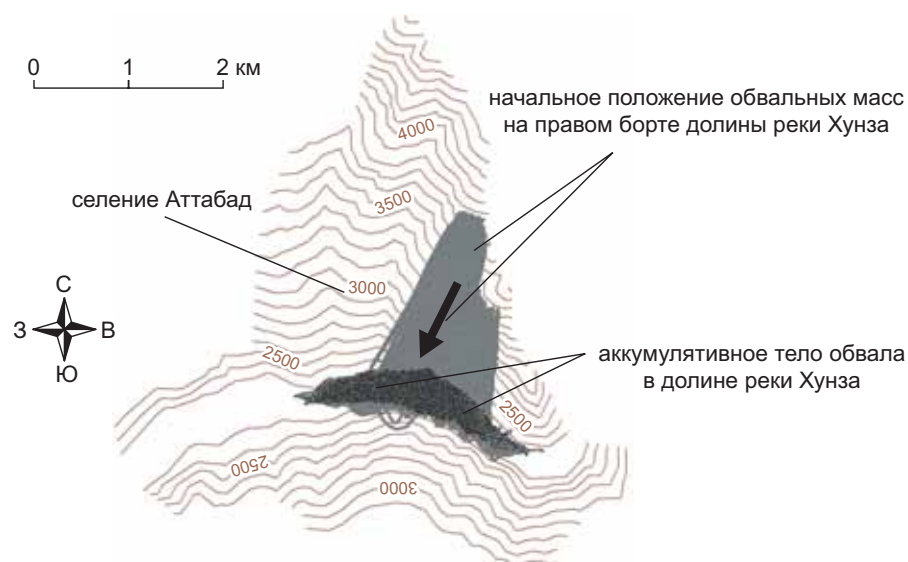


Рис. 15. Результаты моделирования Аттабадского обвала в бассейне реки Хунза с помощью модели DEBRIS. Черным цветом показаны частицы, имитирующие обломки породы; серым цветом показан след движения частиц; горизонталы проведены через 100 м; черной стрелкой показано направление движения потока вещества

склона северной вершины горы Уаскаран до реки Санта составило примерно 250 с (около 4 мин.). Установленная в модели скорость движения фронтальной части потока составляла в среднем от 60 до 70 м/с. Изначально скорость обвала и ледово-каменного потока достигала примерно 80–100 м/с, снизившись до 40–50 м/с при распластывании в долине реки Санта и достигнув 20 м/с при впадении в реку Санта. Установленная глубина потока в долине реки Ранраирка составляла около 100–200 м. Объем отложений обеих частей потока на конусе выноса определен в модели как суммарный объем отложенных в долине реки Санта частиц. Его величина, таким образом, составила примерно 50 млн m^3 .

Обвал-оползень Игун 2000 года

Катастрофический обвал-оползень Игун (Yigong) произошел 9 апреля 2000 года в долине реки Чжаму (Китай, Тибет) (рис. 11). Непосредственно перед катастрофой не было отмечено крупных землетрясений или ливней. Сходу обвала-оползня могло способствовать таяние снега и льда [15]. Начальный ледово-каменный обвал объемом до 100 млн m^3 произошел в верховьях реки Чжаму на высотах 5400–5600 м, после чего обвальные массы устремились вниз по долине со скоростью до 30 м/с. Глубина потока достигала 300 м. При движении по долине ледово-каменный поток вовлек в движение рыхлые толщи и трансформировался в грязекаменный. Его суммарный объем достиг 300 млн m^3 . Далее поток вышел в долину реки Игун и заблокировал ее аккумулятивной толщей длиной 2,5 км, шириной 1,5 км и мощ-

ностью до 100 м, располагавшейся на высотах 2200–2500 м. В результате катастрофы в долине реки Игун погибло 109 человек. Общее время движения потока оценивается в 10 мин. на дистанции 8 км [22].

При моделировании обвала-оползня Игун был выбран сценарий схода оползня вниз по долине реки Чжаму в виде ледово-каменного потока с вовлечением в движение рыхлых толщ. В модели была использована построенная цифровая модель рельефа бассейна реки Чжаму. В верховьях ее долины были автоматически размещены частицы тела оползня и вовлеченного в движение рыхлого материала. Для них были заданы следующие параметры: радиус $R = 20$ м, плотность $\rho = 2500$ кг/ m^3 , коэффициент (угол) сухого трения $\mu = 0,17$, коэффициент вязкого трения $\eta = 0$ кН·с/м, коэффициент упругости (модуль Юнга) $k = 200$ ГПа. Начальная скорость всех частиц принималась равной 0 м/с. Массы начинают двигаться вниз по склону, вовлекая в движение рыхлую толщу, после чего образованный каменный поток начинает движение вниз по долине. Исходя из общего количества автоматически «созданных» частиц (1909 шт.) и вычисленного объема одной частицы (33,5 тыс. m^3) общий объем перемещенного в ходе катастрофы материала составил 250 млн m^3 .

Движение оползня в виде ледово-каменного потока, имитируемое в модели DEBRIS движением частиц, визуализируется в различные моменты времени T (рис. 12). К моменту $T = 50$ с оползневые массы начали движение вниз по долине реки Чжаму, преобразовавшись в каменный поток при вовлечении в движение рыхлого обло-

мочного материала (имитируемого частицами). Далее, к моменту $T = 100$ с каменный поток вышел в долину реки Игун и испытал торможение. К моменту $T = 150$ с он распластался в долине реки Игун, ударившись о ее правый борт. К моменту $T = 200$ с головная часть потока остановилась, сформировав нагромождения обломочного материала неправильной формы. Наконец, к моменту времени $T = 250$ с хвостовая часть потока также остановилась, отложив несомый материал, что привело к дополнительному увеличению нагромождений обломочного материала в долине реки Игун.

Насколько известно авторам, моделирование катастрофы 2000 года в долине реки Игун проводилось впервые. В результате были получены следующие результаты. Общее время движения оползневых масс и затем каменного потока по долине реки Чжаму до полной остановки составило примерно 350 с (около 6 мин.). Полученная в ходе моделирования скорость движения фронтальной части потока составляла в среднем от 20 до 30 м/с. Его максимальная глубина в долине реки Чжаму была примерно равна 300 м (в среднем — до 200 м). Объем отложений потока в долине реки Чжаму определен в модели как суммарный объем нагромождений частиц. Он, таким образом, составил примерно 300 млн м^3 . В целом результаты моделирования в общих чертах соответствуют данным полевых исследований китайских специалистов [15, 22].

Аттабадский обвал 2010 года

Аттабадский (Attabad) обвал произошёл 4 января 2010 года в долине реки Хунза (Пакистан, Каракорум) (рис. 13). Непосредственно перед катастрофой не было отмечено крупных землетрясений или ливней [12]. Возникновению обвала могло способствовать нарушение стабильности склонового чехла и коренных пород, что было обусловлено сильным землетрясением с магнитудой 6,5, произошедшим в исследуемом районе в ноябре 2002 г. [12]. Перед катастрофой наблюдались разрывы сплошности рыхлого чехла на склоне, интенсивно увеличивавшиеся с февраля 2003 г. до момента катастрофы [12]. Обвальные массы объемом, по разным оценкам, от 23 до 45 млн м^3 , обрушились с правого борта долины реки Хунза (с высот 3200–3500 м) и заблокировали днище долины на высоте 2200–2300 м аккумулятивным телом длиной до 2 км, шириной до 600 м и мощностью до 140 м [12, 17] (рис. 14). Общее время движения обвала составило 1,25 мин. на дистанции 3 км [12]. В результате обвала погибли 20 человек. Был разрушен участок Каракорумского шоссе, соединяющего Пакистан с Китаем. Вследствие

блокирования долины реки Хунза сформировалось крупное подпрудное Аттабадское озеро, в некоторых источниках называемое также озером Хунза или озером Гойял [11, 20].

При моделировании Аттабадского события 2010 года был выбран сценарий обвала, блокирующего долину реки Хунза. В модели была использована построенная цифровая модель рельефа участка бассейна этой реки. На правом борту ее долины были автоматически размещены частицы обвалных масс. Для них были заданы следующие параметры: радиус $R = 10$ м, плотность $\rho = 2500$ кг/м^3 , коэффициент (угол) сухого трения $\mu = 0,25$, коэффициент вязкого трения $\eta = 0$ $\text{Па}\cdot\text{с}^2$, коэффициент упругости (модуль Юнга) $k = 40$ ГПа. Начальная скорость всех частиц принималась равной 0 м/с. Исходя из общего количества автоматически «созданных» частиц (2205 шт.) и вычисленного объема одной частицы (4,2 тыс. м^3) общий объем перемещенного в ходе катастрофы материала составил 32 млн м^3 .

Движение обвалных масс, имитируемое в модели DEBRIS движением частиц, визуализируется в различные моменты времени T (рис. 15). К моменту $T = 10$ с оползневые массы начали движение вниз по склону долины, преобразовавшись в каменный поток при вовлечении в движение рыхлого обломочного материала (имитируемого частицами). Далее, к моменту $T = 20$ с каменный поток вышел в днище реки Хунза и ударился о противоположный борт долины, испытав при этом торможение. К моменту $T = 30$ с он рассредоточился в долине реки Хунза по направлениям вверх и вниз по течению. К моменту $T = 40$ с основная часть потока остановилась, сформировав нагромождения обломочного материала. Наконец, к моменту времени $T = 50$ секунд части потока, прошедшие вверх и вниз по долине также остановились, отложив несомый материал в днище долины, что привело к образованию растянутой по долине формы нагромождений обломочного материала с максимальной мощностью и шириной в верхне-средней части.

Таким образом, в результате моделирования были получены следующие результаты. Общее время движения обвалных масс и затем каменного потока по долине реки Хунза до полной остановки составило примерно 90 с (1,5 мин.). Установленная в модели скорость движения фронтальной части обвала составляла в среднем от 50 до 60 м/с. Установленная максимальная мощность его отложений в долине была около 120 м, ширина — около 600 м. Общая длина аккумулятивного тела составила примерно 2,0–2,5 км. Объем отложений обвала в долине реки Хунза определен

в модели как суммарный объем нагромождений частиц. Его величина, таким образом, составила примерно 30 млн м^3 . В целом результаты моделирования в общих чертах соответствуют полевым данным, представленным в работах [12, 17] и в отчетах специалистов гуманитарной организации FOCUS, занимавшихся ликвидацией последствий обвала.

Обсуждение результатов

После рассмотрения конкретных примеров использования модели DEBRIS для случаев катастрофических гравитационных процессов на Центральном Кавказе, в Перуанских Андах, на Тибете и в Каракоруме можно дать общую оценку ее работы для каждого случая.

Моделирование схода селевого потока на город Тырнауз и трансформировавшегося в сель обвала с горы Уаскаран отражает в общих чертах движение селевых потоков, близких к наблюдавшимся в реальности. Наиболее реалистичными характеристиками потоков, полученных в ходе моделирования, являются: траектория движения (с распластыванием на плоских поверхностях и сужением в каньонах), скорость, время добега и объем. Менее детализированными и точными выглядят результаты расчета по модели глубины и ширины потоков, зависящих от размеров групп частиц, имитирующих движение.

Моделирование схода ледника Колька и обвала с горы Уаскаран также отражает в общих чертах движение потоков обломков, близкое к реальности. В данных случаях модели больше соответствуют реальности, чем модель схода селя на город Тырнауз. Это обусловлено дискретностью рассматриваемых потоков обломков, больше соответствующих движению частиц по сравнению с движением селя в виде сплошной среды. Следует отметить, что в случае моделирования Уаскаринской катастрофы применялось динамическое изменение параметров потока, необходимое для описания трансформации водо-каменного потока в селевой. Наиболее реалистичными характеристиками потоков обломков, полученными в ходе моделирования обеих катастроф, являются: траектория движения (с распластыванием и сужением в долине), скорость, время добега, объем и в меньшей степени ширина и глубина.

Моделирование Аттабадского обвала и обвала-оползня Игун также в общих чертах отражает движение потоков обломков, близкое к наблюдавшемуся в реальности. Как отмечалось ранее, это хорошее соответствие обусловлено дискретностью рассматриваемых потоков обломков, движение которых больше соответствует движению частиц. К тому

же обломки в данном случае характеризуются большей однородностью состава. Наиболее реалистичными характеристиками потоков обломков, полученными в ходе моделирования, являются: траектория (с распластыванием и сужением в долине), скорость, время добегания, объем, ширина и глубина. Следует отметить, что моделирование данных катастроф проводилось впервые.

Точность моделирования для каждого рассматриваемого случая при этом можно определить путем наложения друг на друга двух карт с контурами зон катастрофы: (1) реконструированными по данным полевых исследований и дешифрирования аэрофото- и космических снимков; (2) полученными в результате реализации модели. После этого вычисляется доля площади перекрытия от общей площади реконструированной зоны катастрофы. Точность моделей большинства катастрофических событий составляла примерно 80–90%, что достигалось путем верификации входных данных модели и увеличения точности цифровой модели рельефа.

Заключение

Моделирование селевых и склоновых процессов является актуальным в настоящее время в связи с возможностью получения уникальной информации о процессе, необходимой для последующего прогноза и проведения мероприятий по предотвращению или смягчению последствий конкретного катастрофического события с заданными параметрами. Математическая модель потока вещества DEBRIS, разработанная ранее одним из авторов данной статьи, обеспечивает специфический способ решения задачи по определению параметров и результатов движения конкретного потока вещества при заданных начальных и граничных условиях. Наиболее достоверным является моделирование потоков дискретных сред (обвалов, оползней, осыпей), достоверным в меньшей степени — моделирование потоков сплошных сред (селей, водных потоков). Данное различие связано прежде всего с дискретным характером физико-математической основы модели DEBRIS. В перспективе планируется совершенствование этой модели: (1) путем повышения точности и детализации входных данных (цифровой модели рельефа, количества используемых структурных частиц); (2) путем учета дополнительных факторов (неоднородности формы и размера частиц, фазовых переходов, поступления в поток дополнительного вещества со стенок ложа). Для практического решения данных задач необходимы как дальнейшая разработка модели, так и использование вычислительных машин высокой мощности.

Авторы выражают благодарность: Д.А. Петракову, О.В. Тутубалиной, В.Н. Дробышеву, А.В. Петрасову, М.С. Шахминой, К.А. Аристову (географический факультет МГУ, Россия) за помощь в сборе информации; С.Дж. Эвансу (S.G. Evans, Университет Уотерлу, Канада), Д. Шнайдеру (D. Schneider, Цюрихский университет, Швейцария), О. Хангру (O. Hungr, Университет Британской Колумбии, Канада) за предоставление материалов для работы; А.Н. Божинскому, В.А. Светлосанову, Ю.Б. Андре-

еву, В.Н. Кудину (географический факультет МГУ, Россия) за обсуждение с авторами рассматриваемых в статье проблем; Ф. Вэю (F. Wei), Ч. Цзуньлань (C. Zunlan) (Институт горных опасностей и окружающей среды, Китай) за обсуждение результатов исследования.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-05-01127, 12-05-91178-ГФЕН а, NATO Collaborative Linkage Grant 984282 и гранта Ученого совета географического факультета МГУ для молодых сотрудников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адесинов Л.В., Котляков В.М. Ледник Колка в 2002 году: от активации до катастрофы // Материалы гляциологических исследований. 2005. № 98. С. 146–154.
2. Запороженченко Э.В. Сели бассейна Герхожан-Су: история проявления, условия формирования, энергетические характеристики // Сборник научных трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства ОАО «Севкавгипроводхоз». Пятигорск, 2002. С. 80–148.
3. Крыленко И.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Журавлева П.Г. Динамика селевого бассейна р. Герхожан-Су (Кабардино-Балкария) после катастрофы в июле 2000 года // Материалы гляциологических исследований. Вып. 96. 2004. С. 159–166.
4. Михайлов В.О. Классификация численных математических моделей селевых и склоновых процессов // Инженерная геология. 2011. № 3. С. 56–63.
5. Михайлов В.О. Трехмерная математическая модель обвальных процессов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2011. № 4. С. 53–58.
6. Панов В.Д., Лурье П.М., Заруднев В.М. Селевые потоки в бассейне реки Герхожансу (Северный Кавказ) в июле 2000 года // Метеорология и гидрология. 2001. № 2. С. 89–97.
7. Попович В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли. 2003. Т. 7. № 1. С. 3–17.
8. Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // Криосфера Земли. 2005. Т. 9. № 4. С. 62–71.
9. Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 2005. 184 с.
10. Cundall P.A., Strack O.D.L. A distinct element model for granular assemblies // Geotechnique. 1979. № 29. P. 47–65.
11. Dam break study of Attabad landslide / Report to National Disaster Mitigation Authority. Pakistan: National Engineering Services Pakistan (Pvt.) Ltd., 2010. P. 1–18.
12. Dave's Landslide Blog. <http://daveslandslideblog.blogspot.com>.
13. Evans S.G., Bishop N.F., Fidel Smoll L., Valderrama Murillo P., Delaney K.B., Oliver-Smith A. A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru, in 1962 and 1970 // Engineering Geology. 2009. V. 108. P. 96–118.
14. Evans S.G., Tutubalina O.V., Drobyshev V.N., Chernomorets S.S., McDougall S., Petrakov D.A., Hungr O. Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia, in 2002 // Geomorphology. 2009. V. 105. P. 314–321.
15. Han Z.S. Large-scale landslide-debris avalanche in Tibet, China. 1. April-June 2000. Yigong Landslide, Tibet, China // Landslide News. 2003. V. 14–15. P. 22–23.
16. Numerical modeling in micromechanics via particle methods // Proceedings of the 1st International PFC Symposium, Gelsenkirchen, Germany, 6–8 November, 2002 (ed. by Konietzky H.). Balkema, 2002. 334 pp.
17. Petley D. Damming events at Attabad // International Water Power and Dam Construction. 2011. V. 63. № 2. P. 27–29.
18. Petrakov D.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Tutubalina O.V. Catastrophic glacial multi-phase mass movement: a special type of glacial hazard // Advances in Geosciences. 2008. V. 14. P. 211–218.
19. PFC-3D. <http://www.itascacg.com/pfc3d>.
20. Plafker G., Erickson G.E. Nevados Huascarán avalanches. Chapter 8 / B. Voight (ed.). Rockslides and Avalanches. 1. Natural Phenomena. Amsterdam: Elsevier, 1978. P. 277–314.
21. Schneider J.F., Fabian E., Gruber F.E., Mergili M. Recent cases and geomorphic evidence of landslide-dammed lakes and related hazards in the mountains of Central Asia // Proceedings of the 2d World Landslide Forum, 3–7 October, 2011, Rome. 6 p. URL: http://www.mergili.at/publications/schneider_et_al_2011.pdf.
22. Shang Y., Yang Z., Li L., Liu D., Liao Q., Wang Y. A super-large landslide in Tibet in 2000: background, occurrence, disaster and origin // Geomorphology. 2003. V. 54. P. 225–243.
23. Welsch W. Begleitworte zum Hohenlinienplan 1:25000 der Bergsturmzone vom Huascarán am 31. Mai, 1970 // Die Berg- und Gletscherstürze von Huascarán, Cordillera Blanca, Peru. 1983. Hochgebirgsforschung 6 / Patzelt G. (ed.). Innsbruck: Universitätsverlag Wagner. P. 31–50.