

## ОБ ИНИЦИИРОВАНИИ ВЗРЫВОМ СОЗИДАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДЕ

В. В. Адушкин

Институт динамики геосфер РАН, 117979 Москва

Представлен опыт строительства взрывонабросных плотин, энтузиастом которого был академик М. А. Лаврентьев. Отмечены его усилия при сооружении Алма-Атинской селезащитной плотины. На основе опыта промышленных взрывов показана возможность включения природного потенциала с помощью энергии взрыва в созидательную деятельность человека. Представлены данные крупномасштабных процессов обрушения и образования длиннопробежных каменных лавин под действием техногенных и природных факторов. На основе модели твердого тела с неоднородностями описан процесс развития самопроизвольного оползня. В результате предложен единый подход к природным и техногенным рельефообразующим процессам. Сформулированы рекомендации для прогнозирования катастрофических обрушений и возможности их предотвращения.

В природе постоянно происходят события, которые свидетельствуют о непрерывном и активном процессе формирования современного ландшафта. Следуя опыту природы, человек пытается использовать в целях созидания необходимых для себя объектов энергию взрыва, в том числе огромные возможности ядерных взрывов. Одним из ярких примеров подобной созидательной деятельности с использованием энергии взрыва является строительство Алма-Атинской селезащитной плотины, энтузиастом которого был академик М. А. Лаврентьев. Хорошо известно, что Михаил Алексеевич в течение многих лет активно выступал за создание плотины, которая смогла бы надежно защитить Алма-Ату от селевых потоков, ежегодно угрожавших городу и иногда приводивших к катастрофическим последствиям. Необходимо было преодолеть сопротивление многих оппонентов, утверждавших, что взрыв нанесет экологический ущерб природе, что плотина будет размыва очередным паводком, а город будет отравлен продуктами взрыва и разрушен сейсмическими колебаниями от взрыва. Михаил Алексеевич очень ответственно относился к вопросам защиты природы. Достаточно вспомнить его активную позицию в отношении защиты озера Байкал от строительства целлюлозно-бумажного комбината. Безусловно, М. А. Лаврентьев взвешивал, как сооружение плотины взрывом отразится на окружающей природе и состоянии города Алма-Ата. Поскольку плотину следовало построить за очень короткий срок между паводками, было очевид-

но, что никаким другим способом кроме взрывного сделать это невозможно. Важным аргументом в пользу сооружения взрывонабросной плотины было длительное существование в природе завальных плотин и озер, свидетельствовавших об их долговременной устойчивости. Следовательно, обоснованное сооружение взрывонабросной плотины не выходило за рамки природных процессов. Что касается сейсмического воздействия взрыва на городские здания и сооружения, то ответственность за это взял на себя академик М. А. Садовский. Опираясь на опыт регистрации сейсмических волн от мощных подземных ядерных взрывов, он убедительно доказал безопасность сейсмического воздействия планируемого взрыва для города. Следует также отметить, что к этому времени был накоплен отечественный опыт сооружения плотин и перемычек на реках с использованием энергии взрыва. В период 30–60-х гг. был осуществлен целый ряд взрывов с массой зарядов от 3 до 500 т для переключения стока рек и отвода воды, при строительстве ирригационных систем и плотин водохранилищ. Плотины и перемычки характеризовались объемом  $5 \div 160$  тыс. м<sup>3</sup>, высотой  $4 \div 15$  м, длиной по руслу реки  $50 \div 120$  м и шириной по гребню  $10 \div 40$  м.

Указанные аргументы и накопленный опыт применения направленных взрывов позволили в 1966–1967 гг. осуществить строительство взрывонабросной селезащитной плотины на р. Малая Алматинка в 15 км к югу от г. Алма-Ата [1]. Сооружение плотины про-

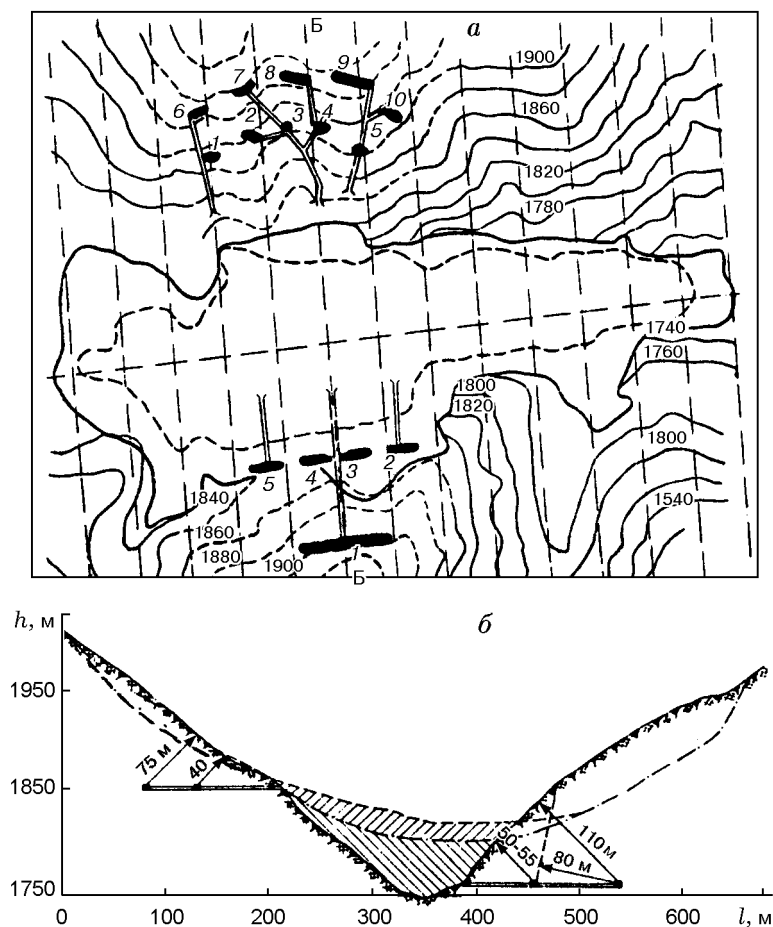


Рис. 1. Результаты алма-атинских взрывов 1966–1967 гг.:

*a* — схема расположения зарядов и контуры взрывонабросной плотины, штриховая линия — граница навала от первого взрыва, сплошная — граница навала от второго взрыва; *б* — поперечное сечение каньона и плотины

водилось двумя последовательными взрывами с обоих берегов ущелья. Поперечное сечение ущелья, схема размещения зарядов и контуры образованной взрывом каменнонабросной плотины представлены на рис. 1. Ущелье на участке взрыва имело почти симметричный профиль с крутыми ( $40 \div 50^\circ$ ) и высокими ( $300 \div 500$  м) склонами. Ширина ущелья по дну  $50 \div 70$  м, на проектной отметке гребня плотины —  $250 \div 300$  м. Породы, слагающие горный массив на участке взрыва, представлены гранитами. Взрыв зарядов первой очереди общей массой взрывчатых веществ (ВВ) 5293 т был проведен на правом берегу ущелья 21 октября 1966 г. Заряды располагались по двухрядной схеме. Первый ряд состоял из четырех штольневых зарядов общей массой ВВ 1689 т на участке длиной 200 м на глубине (по кратчайшему расстоянию

до свободной поверхности — линии наименьшего сопротивления)  $W = 48 \div 58$  м. Второй ряд был представлен одним зарядом массой 3604 т в штольне длиной 93 м ( $W = 107$  м). Заряд второго ряда был взорван через 3,6 с после подрыва зарядов первого ряда. В результате взрыва первой очереди образовалась плотина высотой 60 м, шириной вдоль русла реки 560 м и объемом  $1,5$  млн.  $\text{м}^3$ .

На следующий год 14 апреля 1967 г. был проведен взрыв зарядов второй очереди общей массой ВВ 3946 т на левом берегу ущелья. Заряды этого взрыва также располагались по двухрядной схеме. Первый ряд состоял из пяти зарядов общей массой ВВ 1121 т ( $W = 34 \div 46$  м). Второй ряд состоял из пяти зарядов общей массой ВВ 2825 т ( $W = 65 \div 75$  м) и был взорван через 2 с после подрыва зарядов

Таблица 1

№ п/п	Место	Год взрыва	Порода	Масса ВВ, т	Высота плотины, м	Ширина по руслу, м	Объем плотины, м <sup>3</sup>	Удельный расход ВВ, кг/м <sup>3</sup>
1	р. Аламедин	1959	Порфирит	153	21	280	$1,15 \cdot 10^5$	1,33
2	р. Шамси	1960	Гранит	48	19	250	$6 \cdot 10^4$	0,8
3	р. М.Алмагинка (п. Медео)	1966	— // —	5293	60	560	$1,5 \cdot 10^6$	3,2
		1967		3946	80	560	$3 \cdot 10^6$	2,7
4	п. Байпаза	1968	Известняк	2000	50	550	$1,5 \cdot 10^6$	1,33
5	р. Ах-Су	1972	— // —	552	85	330	$2,5 \cdot 10^5$	2,2
6	р. Бурлыкья	1975	Гранит	703	50	320	$5,4 \cdot 10^5$	1,3
7	р. Алинджачай	1982	Порфирит	689	32	200	$6,1 \cdot 10^5$	1,13
8	п. Квайса	1984	— // —	437	26	250	$1,1 \cdot 10^5$	3,9
9	р. Уч-Терек	1989	Песчаник	1915	45	295	$8,7 \cdot 10^5$	2,2

первого ряда. После взрыва зарядов второй очереди объем плотины увеличился до 3 млн. м<sup>3</sup>, высота плотины достигала 80 м. И уже через год после сооружения плотина задержала крупный селевой поток и защитила город от катастрофы [2]. Таким образом, благодаря активной позиции академика М. А. Лаврентьева был реализован проект строительства уникальной по своим размерам взрывонабросной плотины и продемонстрированы огромные возможности крупномасштабных взрывов.

Опираясь на успешный опыт строительства Алма-Атинской селезащитной плотины с применением крупномасштабного взрыва, в последующие годы были сооружены ещё несколько взрывонабросных плотин различного назначения. В табл. 1 представлен перечень наиболее крупных плотин, возведенных с помощью энергии взрыва за период 1959–1989 гг. Указаны даты проведения взрывов, тип породы на участках взрыва, общая масса использованного ВВ, основные размеры плотины и удельный расход ВВ на перемещение породы в тело плотины. Не останавливаясь на назначении каждой плотины и деталях их возведения, описание которых можно найти в работах [1–4], отметим некоторые практические рекомендации и принципиальные соображения, вытекающие из опыта строительства взрывонабросных плотин. Прежде всего, опыт строительства взрывонабросных плотин показал, как взрыв, применение которого ассоциируется в основном с процессами разрушения, может быть исполь-

зован в созидательных целях — строительстве плотин и искусственных водохранилищ. Очевидные преимущества метода сооружения плотин с помощью взрыва заключаются в использовании местных материалов и сокращении сроков строительства, в возможности применения взрыва в труднодоступных районах при минимальном использовании рабочей силы и, в конечном счете, в снижении стоимости строительства. Особенно очевидными эти преимущества взрывной технологии становились при строительстве крупных плотин. Кроме того, взрывонабросные плотины обладают хорошей сейсмоустойчивостью, что важно при строительстве в высокосейсмичных тектонически активных регионах. Именно эти соображения, а также опыт сооружения Алма-Атинской плотины были использованы при проектировании взрывонабросной плотины Камбаратинской ГЭС в Киргизии [5].

Действительно, место намеченного строительства располагалось в среднем течении р. Нарын в труднодоступном и малонаселенном районе, расположенном к тому же в зоне 9 ÷ 10-балльных землетрясений. Размеры плотины должны были быть уникальными: объем  $\approx 200$  млн. м<sup>3</sup>, высота 270 м. Геометрия выбранного створа с крутыми (40 ÷ 50°) и высокими (1000 ÷ 1200 м) склонами была очень удобной для сооружения взрывонабросной плотины. В целях получения данных и подробного изучения гидротехнических свойств взрывонабросной плотины в феврале 1975 г. был

проведен опытный взрыв с общей массой ВВ 703 т на р. Бурлыкья (см. табл. 1) в условиях, приближенных к створу Камбаратинской ГЭС. Взрыв образовал модель проектируемой плотины в линейном масштабе 1 : 5,4. Исследования гидротехнических свойств этой плотины подтвердили возможность создания однородного, малодеформируемого и достаточно водоупорного тела взрывонабросной плотины [6]. Однако пересчет зарядов выброса по законам подобия на масштаб Камбаратинской взрывонабросной плотины показал, что необходимая масса ВВ достигает  $600 \div 700$  тыс. т. Столь значительная масса ВВ затормозила на время реализацию этого проекта.

В дальнейшем развитии проекта строительства Камбаратинской ГЭС со взрывонабросной плотиной решающую роль сыграли следующие обстоятельства. Из опыта сооружения взрывонабросных плотин было замечено, что наряду с перемещением породы непосредственно энергией направленного взрыва определенный вклад в объем плотины вносит процесс обрушения склона, подработанного взрывом. Это перемещение породы происходит уже под действием природных сил, в частности силы тяжести. Вклад процесса обрушения в тело плотины существенно повышает эффективность использования энергии взрыва. Впервые это ярко проявилось при Байпазинском взрыве, когда за счет обрушившейся породы объем взрывонабросной плотины оказался вдвое выше объема породы, перемещенной энергией взрыва. Этот эффект был целенаправленно использован нами при разработке схем последующих взрывов, примененных при строительстве плотин. В результате при сооружении ряда плотин за счет вклада обрушенной породы удалось снизить удельный расход ВВ до  $1,13 \div 1,33$  кг/м<sup>3</sup> (см. табл. 1). В частности, при сооружении плотины водохранилища на р. Алинджачай (Азербайджан) заряды ВВ были размещены на достаточно большой глубине, так что процесс выброса не получил развития, а произошло только обрушение склона. В результате была образована плотина запланированных размеров при очень низком удельном расходе ВВ, равном  $1,13$  кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, включив процесс обрушения, удалось приблизиться к использованию созидательного потенциала природы за счет перемещения больших масс горной породы без ее выброса энергией взрыва, а только путем сотрясающего

воздействия на склон, с использованием взрыва как спускового механизма. При таком инженерном решении используются те же средства и тот же источник энергии, что и в природе. Одинаково развиваются и процессы перемещения горной массы по склону, создавая идентичные завальные плотины. Различие заключается только в причинах инициирования процессов обрушения. В природе такой причиной является землетрясение, либо взрывное извержение вулкана, либо просто потеря устойчивости склона за счет развития на нем медленного оползня. В нашем случае причиной необходимого обрушения склона был взрыв. В природе процесс обрушения происходит стихийно и неуправляемым образом, приводя иногда к катастрофическим последствиям. В случае сооружения плотины процесс обрушения должен быть управляемым и перемещение породы должно происходить в заданном направлении, формируя необходимую форму плотины. Этот подход был использован при повторном проектировании каменнонабросной плотины Камбаратинской ГЭС. Заряды ВВ были рассчитаны таким образом, что взрыв только подсекал на склоне необходимый объем породы, а ее обрушение и перемещение в тело плотины должны были происходить под действием силы тяжести. Подобным образом происходит образование завальных озер в природе [7, 8]. В результате такого подхода для образования плотины Камбаратинской ГЭС необходимых размеров (объем  $\approx 200$  млн. м<sup>3</sup>, высота 270 м) суммарная масса ВВ в проекте была снижена примерно до 250 тыс. т [9]. После этого в 1986 г. на участке створа Камбаратинской ГЭС были начаты подготовительные работы и сооружены штольни для размещения зарядов ВВ.

Намеченный масштаб взрыва и способ формирования плотины Камбаратинской ГЭС путем обрушения склона и последующего лавинообразного движения горной породы не имели аналогов в мировой и отечественной практике. Поэтому 11 июня 1989 г. в каньоне р. Уч-Терек, расположенном в нескольких десятках километров от основного створа, был проведен опытный взрыв обрушающего действия [10]. Участок взрыва, сложенный из песчаников и алевролитов, расположен в узком каньоне со склонами крутизной  $\approx 50^\circ$ , высотой 200 м и шириной в основании  $3 \div 6$  м. На рис. 2 показан план участка взрыва, а также схема расположения зарядных штолен и подходных вырабо-

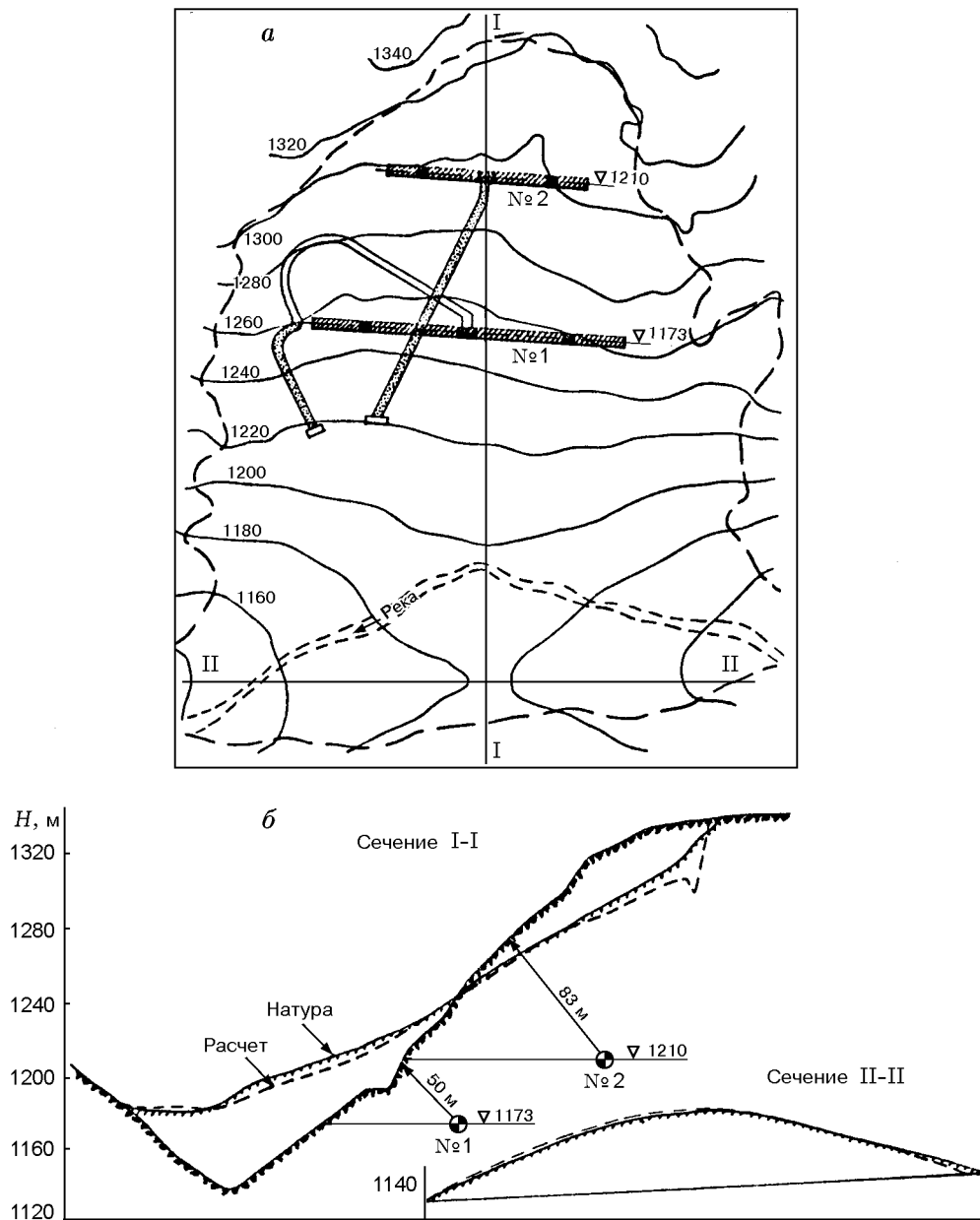


Рис. 2. Результаты взрыва на р. Уч-Терек:

*a* — схема расположения зарядов ВВ № 1, 2 и контуры границы обрушения; *б* — поперечное и продольное сечения завальной плотины

ток. Заряды ВВ располагались на двух ярусах: нижний заряд длиной 145 м и массой ВВ 1088 т располагался на глубине  $W = 50 \div 65$  м, верхний заряд длиной 92 м и массой ВВ 827 т — на глубине  $W = 82 \div 94$  м. В качестве ВВ использован грубодисперсный игданит — смесь 94,5 % аммиачной селитры и 5,5 % дизельного топлива. Нижний заряд обеспечивал сброс породы в каньон и образовывал участок разгона для движения породы, подсекаемой взрывом

верхнего яруса, рассчитанного как заряд рыхления. В результате взрыва образовалась плотина объемом 870 тыс. м<sup>3</sup>, высотой 45 м и шириной вдоль русла 295 м (см. табл. 1). Опытный взрыв на р. Уч-Терек продемонстрировал эффективность образования завальных плотин путем обрушения горной породы со склона с помощью крупномасштабных взрывов рыхления.

Несмотря на успешный опыт сооружения завальной плотины на р. Уч-Терек, серьезные



Рис. 3. Фотография каменной лавины объемом 80 млн. м<sup>3</sup>, образовавшаяся при проведении подземного ядерного взрыва в штольне В-1 на Новоземельском полигоне

опасения вызывал необычно большой с точки зрения инженерной деятельности объем перемещаемой породы в тело Камбаратинской плотины. Поэтому для всестороннего изучения такого сложного явления, как крупномасштабное обрушение, а также для дальнейшего обоснования возможности использования больших объемов обрушения при сооружении завальных плотин был привлечен опыт наблюдений за развитием процессов обрушения и движения каменных лавин при подземных ядерных взрывах, проводимых в горных массивах Новоземельского и Семипалатинского полигонов, а также при сильных землетрясениях и крупных вулканических взрывах. При регистрации внешних явлений, происходящих при подземных ядерных взрывах в условиях горного рельефа, нами были зафиксированы обрушения горной породы в широком диапазоне объемов (от десятков тысяч до сотни миллионов кубометров). Оказалось, что при объемах обрушений  $\approx 1$  млн. м<sup>3</sup> и выше массы горной породы обладают большой подвижностью, образуя длиннопробежные каменные лавины. Подобного эффекта на тех объемах обрушений, которые происходили при сооружении взрывонабросных плотин, не было замечено. Особенно большое обрушение горных склонов было зарегистрировано при проведении штольневых ядерных взрывов на Новоземельском полигоне. На рис. 3 показана фотография самой большой каменной лавины объемом 80 млн. м<sup>3</sup>, которая образовалась при взрыве в штольне В-1. Основные размеры каменных лавин, образовавшихся при наиболее крупных объемах обрушения, приведены в табл. 2. Здесь и далее  $V$  и  $S$  — объем и площадь лавины,  $H$  — высота центра тяжести породы на склоне до обрушения,

$L$  — максимальная дальность распространения фронта лавины от проекции центра тяжести породы на склоне до обрушения на поверхность, где расположена лавина. Практически при всех взрывах условия рельефа для движения каменных лавин были идентичными: обрушенная порода могла беспрепятственно двигаться вниз по склону и далее по местности со слабым уклоном ( $2 \div 5^\circ$ ) вплоть до горизонтальных участков. В таких условиях фронт лавин распространялся на расстояния, существенно большие тех, которые следовало бы ожидать при обрушении породы, исходя из закона сухого трения. Каменная лавина сравнительно равномерно «растекалась» по поверхности, так что отношение площади и ширины лавины к площади и ширине области обрушения на склоне составляло соответственно  $1,2 \div 2,5$  и  $1,1 \div 1,3$  и средняя толщина лавины для объемов обрушения свыше 1 млн. м<sup>3</sup> достигала  $20 \div 27$  м. С увеличением объема обрушения заметно воз-

Таблица 2

Взрыв	$V$ , м <sup>3</sup>	$S$ , м <sup>2</sup>	$H$ , м	$L$ , м	$L/H$
В-1	$8 \cdot 10^7$	$3,5 \cdot 10^6$	400	1900	4,75
А-8	$2 \cdot 10^7$	$7,5 \cdot 10^5$	350	900	2,57
А-6	$8 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^5$	450	1200	2,67
А-10	$5 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^5$	350	900	2,57
А-2	$2 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^5$	300	700	2,33
А-9	$5 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^4$	350	750	2,14
А-3	$10^5$	$3 \cdot 10^4$	430	900	2,1
А-12	$4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	300	550	1,83

Таблица 3

Событие	Страна	$V, \text{ м}^3$	$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$L/H$
Эльм	Швейцария	$10^7$	1700	550	3,1
Мадисон	США	$2,8 \cdot 10^7$	1600	400	4,0
Франк	Канада	$3,7 \cdot 10^7$	3200	920	3,5
Голдау	Швейцария	$3,9 \cdot 10^7$	1670	560	3,0
Джангей	Перу	$5,7 \cdot 10^7$	15200	3050	5,0
Айни	Таджикистан	$10^8$	3000	600	5,0
Хаит	Таджикистан	$5 \cdot 10^8$	6000	850	7,0
Флимс	Швейцария	$1,25 \cdot 10^{10}$	16200	1220	13,3
Сейдмарч	Иран	$2,1 \cdot 10^{10}$	14500	920	15,9

Таблица 4

Вулкан	Страна	$V, \text{ м}^3$	$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$L/H$
Шивелуч	Россия	$1,6 \cdot 10^9$	15	1,7	9
Безымянный	Россия	$8 \cdot 10^8$	$15 \div 18$	2,0	$7 \div 9$
Камень	Россия	$10^9$	23	$2,5 \div 2,8$	$8 \div 9$
Сент-Хеленс	США	$2,7 \cdot 10^9$	20	$1,7 \div 2,0$	$10 \div 12$

росла относительная дальность распространения фронта лавины: от  $L/H \approx 2$  для объемов  $10^4 \div 10^5 \text{ м}^3$  до  $L/H \approx 5$  для объемов порядка  $10^8 \text{ м}^3$ . Из приведенных фактов следовало, что при увеличении масштаба обрушения характер движения горной массы приобретает новые черты, похожие на движение вязкой жидкости.

Для анализа особенностей движения еще более крупных объемов обрушения были привлечены известные данные [8, 11, 12] о наиболее крупных каменных лавинах, возникавших в природных условиях под воздействием землетрясений или техногенной деятельности (табл. 3). Из табл. 3 следует, что в природных условиях отмечены факты образования каменных лавин при обрушении объемов горной породы порядка  $10^{10} \text{ м}^3$ , дальность распространения которых в 13–16 раз превышала высоту области обрушения. Некоторые каменные лавины естественного происхождения имели объемы  $10^7 \div 10^8 \text{ м}^3$ , соответствующие размерам наиболее крупных лавин на Новоземельском полигоне.

К анализу были привлечены также данные о каменных лавинах, возникавших при крупных взрывных извержениях вулканов [13].

В табл. 4 приведены размеры ряда таких лавин.

Интересные особенности обрушения отвалов горных пород были зарегистрированы на Центральном руднике в Хибинах [14]. Отсыпка этих отвалов проводится на склонах плато Росвумчарр на отметках  $900 \div 1000 \text{ м}$ . Крутизна склонов  $30 \div 50^\circ$ . По мере накопления горной породы происходят внезапные обрушения этих отвалов в смеси со льдом и снегом. Объемы ряда таких обрушений и дальность распространения образовавшихся при этом лавин приведены в табл. 5.

В некоторых случаях обрушение горных пород с горных склонов происходит в условиях узких каньонов и крутых изгибов горных рек, когда распространение обрушающейся массы ограничено с фронтальной стороны противоположным склоном [8, 15]. В табл. 6 приведены некоторые примеры крупных обрушений в условиях их ограниченного распространения.

На основании данных табл. 2–6 построена зависимость относительной дальности распространения каменных лавин от объема обрушения (рис. 4). Кривая 1 проведена по группе точек, представляющих каменные лавины на

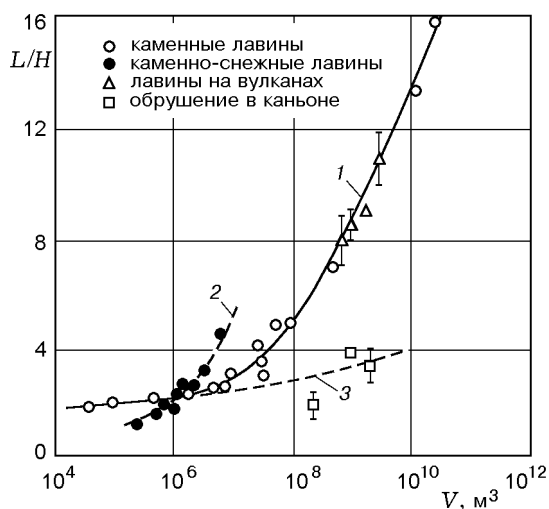


Рис. 4. Зависимость относительной дальности распространения каменных лавин от объема обрушения

Новоземельском полигоне и природные каменные лавины, имевшие возможность свободно распространяться в каком-либо направлении. Следует отметить хорошее соответствие данных об относительной дальности распространения каменных лавин взрывного и естественного происхождения в диапазоне объемов  $V = 10^7 \div 10^8 \text{ м}^3$ . В диапазоне небольших объемов обрушения ( $10^4 \div 10^6 \text{ м}^3$ ) относительная дальность распространения фронта лавин практически постоянна и составляет  $L/H \approx 2$ . При возрастании объемов обрушения свыше  $10^6 \text{ м}^3$  наблюдается быстрый рост дальности распространения лавин, так что при  $V \geq 10^7 \text{ м}^3$  наблюдается  $L/H \geq 3$ . В этом диапазоне объемов обрушения кривой 1 также удовлетворительно соответствуют данные о распространении лавин, образовавшихся при взрывных извержениях вулканов (см. табл. 4). При  $V \geq 10^6 \text{ м}^3$  кривая 1 может быть описана эмпирической зависимостью

$$L/H = 0,13 V^{0,2}. \quad (1)$$

Заметно выделяются более высокой подвижностью снежно-каменные лавины, образующиеся при обрушении отвалов в Хибинах (кривая 2 на рис. 4). Возможно, что присутствие льда и снега снижает сопротивление при движении таких лавин, приводя к повышению дальности их распространения уже при  $V > 10^6 \text{ м}^3$ .

Также не соответствуют кривой 1 на рис. 4 данные крупных обвалов в тех случа-

Таблица 5

Номер лавины	$V, \text{ м}^3$	$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$L/H$
1	$2 \cdot 10^6$	1100	400	2,7
2	$7 \cdot 10^5$	400	250	1,6
4	$1,5 \cdot 10^6$	1000	400	2,5
5	$1,3 \cdot 10^6$	500	250	2,0
6	$2,4 \cdot 10^6$	1100	400	2,7
8	$2,6 \cdot 10^6$	900	370	2,4
9	$6 \cdot 10^6$	3000	650	4,6
15	$3 \cdot 10^5$	240	170	1,4
17	$4 \cdot 10^6$	1600	500	3,2

ях, когда горная порода со склона обрушается в узкий каньон таким образом, что условия для ее неограниченного распространения отсутствуют либо по причине крутого противоположного склона и изгиба каньона, препятствующего растеканию горной породы, либо за счет недостаточной высоты обрушения. В таких условиях образуются естественные каменные завалы достаточно компактной формы и большой высоты. Этот случай на рис. 4 представлен группой точек в диапазоне объемов обрушения  $10^8 \div 10^{10} \text{ м}^3$  и по ним проведена штриховая кривая 3. За дальность продвижения горной массы у таких завалов принята их протяженность вдоль каньона. Наиболее интересным представителем такого рода обрушений является Усойский завал, возникший на Памире во время землетрясения в 1911 г. Этот завал объемом  $2,2 \text{ км}^3$  перегородил р. Бартанг плотиной высотой 800 м, длиной вдоль русла  $\approx 5 \text{ км}$  и образовал Сарезское озеро объемом  $18 \text{ км}^3$  и длиной более 60 км на высоте свыше 3000 м [8]. Длительное существование Усойского завала свидетельствует о его хороших водопорных свойствах и показывает, что в стесненных условиях узких каньонов возможна локализация больших объемов обрушения без образования каменных лавин. Это обстоятельство является важным для перспектив строительства завальных плотин при помощи энергии взрыва, в том числе и взрывов сотрясающего действия. Отметим, что при проведении подземных ядерных взрывов в подобных условиях не было обрушения горных склонов. Показанная на рис. 3 каменная лавина от взрыва



Таблица 6

Событие	Страна	$V, \text{ м}^3$	$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$L/H$
Вайонт	Италия	$2,5 \cdot 10^8$	400 ÷ 600	200 ÷ 400	1,5 ÷ 2,5
Ирхт	Таджикистан	$10^9$	4000	1000	4,0
Усой	Таджикистан	$2,2 \cdot 10^9$	5000	1200 ÷ 1500	3 ÷ 4

в штольне В-1 перегородила достаточно широкую долину р. Журавлевки (ширина долины на этом участке  $\approx 2$  км) и образовала искусственное озеро, которое было названо Наливным. Оно существует до сих пор. Следовательно, каменная лавина выступила в роли завальной плотины. Внутри каменной лавины сформировался фильтрационный поток, интенсивность которого изменяется таким образом, что весенний приток воды не размывает тело лавины, а при снижении уровня озера поддерживает его существование в течение всего года.

Эмпирическая зависимость (1) и кривые 1–3 на рис. 4 позволяют прогнозировать последствия обрушений, определять условия образования каменных лавин и оценивать их размеры в зависимости от величины объема обрушения, высоты его расположения и рельефа местности. Особого внимания заслуживают объемы обрушений свыше миллиона кубометров. Процесс развития обрушения в этих случаях сопровождается своеобразным масштабным эффектом, приводящим к «аномальной» подвижности горной массы и соответствующему увеличению дальности ее распространения.

Обратим также внимание на то обстоятельство, что при проведении мощных подземных взрывов были воспроизведены многие рельефообразующие процессы, характерные для самой природы: обрушение горных склонов, образование завалов, значительные горизонтальные перемещения горных масс. Таким образом, взрыв позволил зарегистрировать и понять некоторые природообразующие процессы. Он также продемонстрировал, что то, что природа иногда делает сама, без вмешательства человека, можно сделать с использованием энергии взрыва, т. е. проводить обустройство среды обитания в союзе с природой, с использованием ее потенциала и по ее законам.

Проведенный анализ данных техногенных и природных обрушений, в том числе с образованием длиннопробежных каменных лавин, относится к случаю силового воздействия на

дневную поверхность либо подземными химическими или ядерными взрывами, либо мощными землетрясениями или вулканическими взрывами. Однако в природе наблюдаются процессы самопроизвольного обрушения горных склонов, развивающиеся под действием силы тяжести. В таких случаях обычно идет скрытая и малозаметная подготовка оползня. Такая подготовка оползня обусловлена развитием деформационных процессов в массиве вблизи склона. Деформационный процесс, в результате которого формируется тело оползня, протекает очень медленно и сопровождается дезинтеграцией сплошной среды. Запасы дезинтегрированной породы на склонах непрерывно пополняют эрозионные и разнообразные экзогенные процессы. Процесс дезинтеграции неизмеримо увеличивает подвижность горных масс на склоне. Время от времени склоны сбрасывают рыхлый дезинтегрированный слой породы. В том случае, когда большая площадь склона одновременно очищается от дезинтегрированной горной массы и эта масса достаточно велика, образуется каменная лавина. Движение этой лавины подчиняется тем же законам, о которых мы говорили выше. Поэтому в процессе подготовки самопроизвольного обрушения важен самый начальный этап, в течение которого происходит медленное развитие деформационного процесса, непрерывно изменяющего напряженное состояние дезинтегрированного слоя на склоне. Для того чтобы освобождение склона от дезинтегрированной массы произошло одновременно на большой площади, необходимо иметь на этой площади однородное напряженное состояние — запас упругой энергии. Такое напряженное состояние возникает в массиве сползающего слоя при торможении его каким-либо препятствием. Деформационный процесс, в результате которого формируется тело оползня, описан в работе [16] на основе модели твердого тела с неоднородностями [17]. Было показано, что наиболее важной характеристикой деформационного процес-

са является скорость смещения фиксированных точек склона. Размер оползневого тела зависит от крутизны склона и напряжения сдвига в основании оползневого блока. Критерием опасности возникновения оползня служит скорость смещения, равная нескольким сантиметрам в год. Время подготовки оползня определяется размером оползневого блока, скоростью деформации породы в пределах этого блока и скоростью смещения, при которой крип сопровождается дезинтеграцией сплошной среды. Оценки показывают, что при размерах оползневого блока порядка  $10^2$  м и скорости смещения, равной нескольким сантиметрам в год, время подготовки оползня на склоне крутизной  $\approx 30^\circ$  будет изменяться в диапазоне  $1 \div 10$  лет.

### ВЫВОДЫ

- Разработаны предпосылки для единого подхода к природным и техногенным рельефообразующим процессам.
- Предложена концепция максимального использования природного потенциала для обустройства среды обитания путем согласования инженерных решений с региональными проявлениями современных рельефообразующих движений земной коры.
- В качестве одного из возможных способов включения природного потенциала в созидательную деятельность предложено использование энергии взрыва. В принципе, возможны и другие инженерные решения в целях использования природного потенциала и предотвращения опасностей, связанных с развитием оползневых явлений.
- Попытки удержания оползневого склона за счет каких-либо инженерных решений могут приводить к обратному эффекту, поскольку возрастает уровень напряженно-деформированного состояния, увеличиваются размеры оползневого блока и соответственно запас потенциальной энергии оползня.
- Показана принципиальная возможность прогнозирования силовых и самопроизвольных процессов обрушения, величины их объема, условий образования длиннопробежных лавин и дальности их распространения. При использовании инструментальных методов наблюдений на основе разработанной методологии возможна разработка мер по предупреждению катастрофических последствий оползневых и лавинообразующих процессов на стадии их медленного движения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Механический** эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов, В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко и др. М.: Недра, 1971.
2. **Покровский Г. И., Чемин А. Н.** Противоселевая плотина предотвратила катастрофу // Природа. 1974. № 3.
3. **Адушкин В. В., Перник Л. М.** Моделирование направленных взрывов при сооружении каменнонабросных плотин // Взрывное дело № 82/39. М.: Недра, 1980.
4. **Применение** массовых взрывов в строительстве / М. Ф. Бурштейн, Г. И. Покровский и др. М.: Недра, 1980.
5. **Берцов В. Г., Комаристый В. В., Струсман Р. Я.** Проектирование строительства взрывонабросных плотин Камбаратинских ГЭС // Энерг. стр-во. 1990. № 6.
6. **Корчевский В. Ф., Петров Г. Н.** Геотехнические исследования опытной взрывонабросной плотины на р. Бурлыкья // Гидротехн. стр-во. 1977. № 5.
7. **Костюченко Э. В., Крошкин А. Н.** Краткие сведения о некоторых завалах естественно-го происхождения на горных реках Киргизии // Изв. АН Кирг.ССР. Сер. естеств. и техн. наук. 1963. № 8.
8. **Агаханиянц О. Е.** Сарез: озеро на Памире. Л.: Гидрометеиздат, 1989.
9. **Адушкин В. В., Зыков Ю. Н., Перник Л. М.** Определение параметров крупномасштабных взрывов для строительства взрывонабросных плотин Камбаратинских ГЭС // Энерг. стр-во. 1990. № 6.
10. **Адушкин В. В., Зыков Ю. Н., Перник Л. М.** Особенности развития взрыва при образовании завальной плотины // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1991. № 2.
11. **Солоненко В. П.** Землетрясения и рельеф // Геоморфология. 1973. № 4.
12. **Геологические** стихии / Б. А. Болт, У. Л. Хорн, Г. А. Макдональд, Р. Ф. Скот. М.: Мир, 1978.
13. **Апродов В. А.** Вулканы. М.: Мысль, 1982.
14. **Отвалы** на горных склонах / Э. Б. Красносельский, Г. В. Калабин и др. Л.: Наука, 1975.
15. **Мюллер Л.** Оползень в долине Вайонт // Проблемы инженерной геологии. М.: Мир, 1967.
16. **Адушкин В. В., Родионов В. Н.** О режиме оползней на горных склонах // Динамические процессы в геосферах: геофизика сильных возмущений. М.: ИДГ РАН, 1994.
17. **Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М.** Основы геомеханики. М.: Недра, 1986.

Поступила в редакцию 10/VII 2000 г.