

Ю. Б. Виноградов

**ЭТЮДЫ
О СЕЛЕВЫХ
ПОТОКАХ**



Ленинград
Гидрометеониздат
1980

26.222
В49

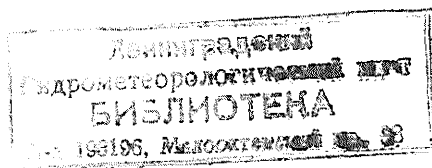
- В49 **Виноградов Ю. Б.**
Этюды о селевых потоках. Л., Гидрометеоиздат,
1980, 144 стр. и илл.

Предлагаемая вниманию читателей книга д-ра техн. наук Ю. Б. Виноградова, крупнейшего специалиста в области гляциальных селей, повествует о редком, но грозном явлении — селевых потоках. В ней рассказывается о сущности явления, о природных процессах, приводящих к его возникновению, о зарождении и движении потоков, о селезащите. Описаны известные селевые потоки, списавшие себе мрачную славу.

Интересна любителям природы и всем, кто путешествует, работает или живет в горах.

В 20806-084
069(02)-80 54-80 1903030200

5188003



От автора

Эта книга повествует о выдающемся стихийном явлении природы, в силу ряда обстоятельств не очень известном широкому кругу читателей. Я постарался, насколько смог, рассказать о нем, а также о людях, посвятивших себя его изучению. Возможно, некоторые селевики не согласятся со мной в трактовке кое-каких моментов или в оценке отдельных событий, но смею уверить — здесь написано только то, что я думаю на самом деле.

Признаюсь, что когда я положил перед собой лист белой бумаги и начертил на нем слова „Этюды о селевых потоках“, то, кажется, я имел в виду не совсем то, что получилось. Не знаю, насколько удачно мне удалось провести читателя через „минное поле вопросительных знаков“, но, во всяком случае, я не мог себе позволить изобразить гладкость и упорядоченность там, где в действительности мы, селевики, безумствуем или издаем детский лепет.

Я всегда считал более привлекательным не словарно-энциклопедический тон „научно-популярных поучений“, а способ передачи информации через призму индивидуальности автора. Поэтому текст „Этюдov“, в самом крайнем случае, должен восприниматься как мое „особое мнение“ о селевках и селеведении. Если такая постановка вопроса вам импонирует, то приступайте ничтоже сумняшеся.

Если вы встретите в тексте какие-либо непонятности, то, вероятнее всего, в одном из последующих этюдов сумеете найти и разъяснение.

1. ГОРЫ И ПОТОКИ

Прескучными людьми были бы мы, друзья, если бы горы не пробуждали в нас живого интереса, не вызывали восторженных чувств.

Чарльз Стонор. Шерпы и снежный человек

Человек осваивает горы. Он настойчиво рвется туда по туристским тропам с рюкзаком, по дорогам и воздуху со строительными материалами, оборудованием, домашним скарбом. Горы вносят свой вклад в здоровье человека, в его экономику, в его искусство и науку. Они способствуют его настроению, успехам в труде и творчестве, в любви...

Но горы могут быть и коварными, грозными, беспощадными. Такими их делают стихийные явления природы и, в первую очередь, селевые потоки.

С селевыми потоками знакомы все, кто живет или работает в горах, хотя слово „сель“ на разных языках звучит по-разному. Обычно оно соответствует понятию „грязевой“, „грязекаменный поток“, но иногда является и непереводаемым: мур, муре (Австрия, ГДР, ФРГ), руфф, рюффе (Швейцария), гисс, гиссе (Каринтия в Австрии), цуге (кантон Валлис в Швейцарии), банджир (Ява), сва (Каракорум, Гималаи), уайко (Перу), ямацунами (Япония). Само слово „сель“ заимствовано из арабского и тюркских языков, где оно или его созвучные варианты переводятся как „поток“, иногда с добавлением некоторых определений.

Что же такое сель? Это — горный поток, состоящий из смеси воды и рыхлообломочной породы.

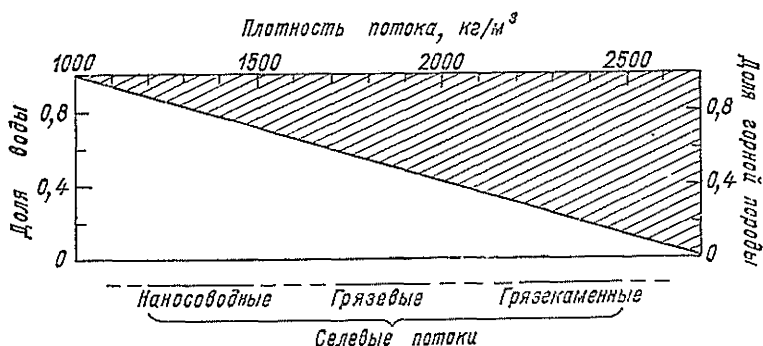
Возникают селевые потоки во время особо интенсивных ливней или при прорыве моренных озер и других ледниковых водоемов в результате взаимодействия воды и рыхлообломочной породы в ложбинах и ущельях, имеющих большой уклон. Основные признаки селей: внезапность и кратковременность действия.

Соотношение количества твердого и жидкого вещества, которое может быть выражено величиной плотности смеси, — главное и определяющее свойство потока. Напомним, что плотность воды составляет 1000 кг/м^3 , а плотность вещества горной породы будем полагать равной 2700 кг/м^3 , что приблизительно соответствует действительности в подавляющем большинстве

случаев. Плотность селевых потоков колеблется в широком диапазоне — от 1100 до 2500 кг/м³.

Наряду с плотностью поведение смеси (селевой массы) определяется ее составом, т. е. относительной массой частиц разных размеров.

В зависимости от состава и плотности селевой массы различают три типа селей: наносоводные, грязевые и грязекаменные.



Взаимосвязь между соотношением воды и горной породы, плотностью селевой массы и качественными определениями трех типов селевых потоков.

ные. Указать точные граничные значения плотности для отдельных типов селевых потоков невозможно, но приближенные „стертые“ границы для наносоводных, грязевых и грязекаменных потоков вырисовываются достаточно отчетливо: 1100—1500, 1600—2000, 2100—2500 кг/м³.

Наносоводный — селевой поток, возникающий при прохождении сильного паводка, срывающий крупнообломочный русловой материал, так называемую самоотмостку, и переносящий большое количество взвешенных и влекомых наносов за счет своей транспортирующей способности.

Грязевой — селевой поток высокой плотности, состоящий из грязи с возможным включением обломков горной породы.

Грязекаменный — селевой поток предельно высокой плотности, состоящий из обломков горной породы, промежутки между которыми заполнены грязью.

Как и другие стихийные явления, селевые потоки вписали многие мрачные страницы в историю борьбы человека с природой. Гибель людей, частично или полностью уничтоженные населенные пункты, разрушенные мосты и дороги, занесенные поля и сады, расходы на ликвидацию последствий вредного воздействия селей и на селезащиту — вот та цена, которую платит человечество за недосмотр, неумение, опрометчивость, за пренебрежение к селевым потокам.

Но не следует воспринимать сели только как враждебное начало. Их существование в природе естественно и целесообразно.

Для того чтобы полностью оценить важность миссии, которую выполняют на Земле селевые потоки, обратимся к новейшей геологической теории, глобальной тектонике или тектонике плит. Согласно этой теории, все происходящие на нашей планете геологические события — землетрясения, вулканические извержения, горообразование — вызываются единой и всеобъемлющей причиной: движением гигантских плит, слагающих внешнюю оболочку планеты. Таких плит немного: Африканская, Американская, Антарктическая, Евразийская, Индийская, Тихоокеанская — всего шесть крупных и столько же мелких, причем границы их не обязательно совпадают с привычными для нас границами материков. Обычно полагают, что смещение плит, скорость которого составляет 15—100 мм в год, вызывается крупномасштабной конвективной циркуляцией в подстилающей жидкой мантии.

Высочайшие горные цепи мира появились в результате столкновения таких плит, сопровождавшегося деформацией их краевых частей и выдавливанием материала, слагающего океаническое дно. Гималаи — это результат столкновения Индии и Азии, Альпы — оторвавшейся от Африки Италии и Европы, Кавказ — Аравии и Евразии.

Процесс, противоположный горообразованию, называется денудацией. Он объединяет в себе целую группу более элементарных процессов, направленных на уничтожение гор и возвышенностей и общее сглаживание поверхности планеты.

Горная порода под совместным воздействием воды, льда, ветра, колебаний температуры, химических и биологических явлений разрушается. Под влиянием силы тяжести продукты разрушения (выветривания) осыпаются вниз и накапливаются в рывтинах, бороздах и понижениях.

В заключительном акте на сцену выступают процессы переноса — продукты выветривания перемещаются с гор на равнину под воздействием в первую очередь текущей воды и в меньшей степени льда и ветра. Роль ледниковой эрозии в свое время была сильно преувеличена, многие отложения, традиционно считавшиеся гляциальными, на проверку оказались селевыми. Другое, ставшее классическим, преувеличение связано с водной эрозией, которой всегда отводилась главенствующая роль в общем процессе денудации. Тем не менее известно, что отдельный селевой поток в небольшом горном бассейне одновременно может вынести столько обломочного материала, сколько его водному собрату, проходящему по тому же руслу, не одолеть и за сотню лет. Стало быть, и в этом случае селевые процессы в большей мере определяют ситуацию, особенно если учесть, что резкое увеличение наносов в реках часто также связано с усилением селевой деятельности и что крупные валуны и глыбы, легко и непринужденно выносимые грязекаменными

потоками, ручьям и рекам не под силу даже сдвинуть с места.

Таким образом, можно констатировать, не принижая значения других процессов переноса, что природа использует селевые потоки в качестве одного из основных агентов денудации. Поэтому роли селей в истории формирования рельефа и облика земной поверхности, до сих пор недооцениваемой, все должны отдать должное.

Под поверхностью нашей планеты,
От людских ощущений скрыто,
Море мантии разогретой
На себе переносит плиты.

Континент, словно плот гигантский,
Потеснив своего партнера,
Возводил из вод океанских
На планете хребты и горы.

Эти памятники природы,
Что стоят под дождем и ветром,
Холод, жар, ледники и воды
Разрушают метр за метром.

Осыпаясь, куски породы
Заполняют горные шрамы,
Проводя за долгие годы
Подготовку природной драмы.

Срок настанет, придет день гнева,
И на дно притихшей долины
Устремятся справа и слева
Грязекаменные лавины.

Как каналы обратной связи,
Исполняя закон природы,
Эти реки из жидкой грязи
Переносят из гор породу.

Лишь когда ты поймешь стихию,
То откроется смысл глубокий
В том, что есть на свете такие
Грязекаменные потоки.

2. СЕЛИ НА ПЛАНЕТЕ

...И окинем нашу материнскую планету критическим взглядом.

*Фред Л. Уинпл. Земля, Луна
и планеты*

Посмотрите на горы мира: они покрыты язвами селевых очагов, исполосованы шрамами селевых русел. Горные долины и окрестные равнины — это грандиозная свалка селевых выносов.

География селей — география гор. Формула „где горы — там и селевые потоки“ несомненно правильна. Но разнообразие горных ландшафтов безмерно. Столь же безмерна и пестрота селепроявлений на лике Земли. Однако характер общих закономерностей их распределения в зависимости от главных определяющих факторов очевиден.

Рельеф — это тот плацдарм, где разворачиваются селевые процессы. Обычно чем выше горы, тем большего от них может ожидать селевик. Но высота сама по себе еще ни о чем не говорит. Северный Тибет, Восточный Памир, Альтиплано в Боливии — плоскогорья, поднятые на высоту 4—5 тыс. м, не отмечены выдающейся селевой деятельностью. Важны контрасты, молодость рельефа, взлет склонов и вершин над узкими и глубокими долинами. И если говорить о карте рельефа, наилучшим образом информирующей о селеопасности территории, то это будет карта уклонов, но не гипсометрическая. При прочих равных условиях хребты окраин горных сооружений, первыми принимающие на себя удар влагоносных воздушных масс, более селеактивны.

Горная порода — это материал, из которого природа лепит сели. Скальные и рыхлые породы слагают поверхность Земли. Очевидно, что их свойства уже сказались в облике рельефа. Рыхлые породы в той или иной мере подготовлены к селеформированию. Что же касается скальных пород, то нас в первую очередь должна интересовать податливость их выветриванию, т. е. способность превращаться в свою рыхлую разновидность.

Вода — это ливни, прорвавшиеся озера и внутриледниковые водоемы. Часто именно отсутствие воды лимитирует селепроявления.

Многочисленные скальные селевые очаги на южном склоне Рушанского хребта, легко обозреваемые с Памирского тракта, вследствие слабых ливневых возможностей района десятки и сотни лет ждут своего часа. Конечно, рано или поздно долготерпение их будет вознаграждено, но станем ли мы этому свидетелями?

На земном шаре много сухих мест, где дожди выпадают крайне редко. Это, например, Сахара, пустыня контрастов и

парадоксов, отмеченная редкостью и в то же время удивительной силой дождей. Ливневые воды на короткое время переполняют сухие русла, имеющие здесь специфическое наименование „вади“, и одна из главных опасностей, подстерегающих вас в Сахаре,— это опасность утонуть.

Перенесемся на 10 тыс. км к тихоокеанскому берегу Южной Америки. Здесь, у подножия Анд, лежит одна из самых сухих местностей нашей планеты. Тысячи селевых бассейнов томятся в бесплодном ожидании. Но дожди случаются и здесь. Обыденность нарушается резким усилением теплого океанического противотечения Эль-Ниньо. Последствия этого бывают ужасными. Внезапно возникшие нагромождения облаков изливаются на склоны гор грандиозными ливнями, грязекаменные и наносоводные потоки устремляются через прибрежную равнину в океан, разрушая по пути дороги, мосты, оросительные системы и заноса поля селевыми отложениями. Есть сведения, что подобные явления случались и во времена инков, а в наше время — в 1878, 1884, 1891, 1918, 1925, 1932 и 1939 гг. В перуанском портовом городе Трухильо с 1918 до 1925 г. выпало всего 36 мм осадков, а за 7—9 марта 1925 г.— 226 мм.

Величайшая выпуклость Земли Тибет почти неселеопасна и лишь в центральной части отмечена ареалами гляциальных селепроявлений, в таких массивах, как Алинг-Гангри, Кайлас, Улугмузтаг, Тангла, Ньенчен-Тангла. Но внешние уступы этого гигантского пьедестала являются районами, в высшей мере подверженными селевой деятельности, районами торжества самых разнузданных и бесчинствующих селепроявлений.

Большие Гималаи, тщетно пытающиеся отгородиться от муссона грядой Сивалика, отбиваются тысячами грязекаменных потоков и бурными наносоводными чо (пенджабское название селя).

Гиндукуш, засыпающий себя осыпями, истерзаный потоками всех классов и типов, также оспаривает пальму селевого первенства.

Западный Куньлунь через лабиринт узких сумрачных ущелий выбрасывает многочисленные селевые потоки на Таримскую равнину. Северо-восточная засушливая окраина — горные системы Восточного Куньлуна, Алтынтага и Наньшаня — также служит ареной действия великого множества наносоводных и грязекаменных селей, нагромождающих у подножия хребтов обломочный материал.

А юго-восточная периферия Тибета, горная страна Кам, поражающая зрителей особой грандиозностью ландшафта? Здесь, среди глубоких речных ущелий, узких скалистых гребней, врезов и рытвин, селевая деятельность достигает невиданного напряжения.

А сверкающий ледниками Каракорум, откуда как бы „начинаются“ все горы Азии! Каракорум известен особым размахом гляциально-селевых явлений: озера здесь непрерывно подпруживаются, причем такие внутриглетчерные водоемы, как

знаменитое Гапшан на Шайоке, опорожняются, моренные озера прорываются, грязекаменные лавины, или сва, как их здесь называют, обрушиваются почти из каждой ложбины.

Памир, Алай, Тянь-Шань, где сели случаются повсеместно и часто, имеют уголки, пользующиеся особой известностью. Это Занлийский Алатау, атакующий Алма-Ату грязекаменными потоками, Киргизский хребет, Ферганская долина со своими селеопасными адырами и горным окружением, Гиссарский хребет с грязекаменными селепроявлениями Кафирнигана, Варзоба, Туполанга и наносоводными потоками на юго-западных окраинах. Здесь хорошо известны сели Дарваза, горного обрамления озера Иссык-Куль, бассейнов Зеравшана, Сурхоба, Обихингоу, озернопрорывные шалости ледников Медвежьего на Ванче и Иныльчека в районе Хантенгри.

На Алтае и в Саянах тоже грохочут селевые потоки, особо ожесточены они на юге, где наносоводные уиры Монгольского и Гобийского Алтая приобретают невиданный размах.

С продвижением к северо-востоку грязекаменные потоки и камни в селевой массе мельчают, но это частично компенсируется числом и интенсивностью селепроявлений, мощностью наносоводных селей, чему в немалой степени способствует многолетняя мерзлота. Колоссальная полоса гор, тянувшаяся от Байкала на восток, а затем на северо-восток вдоль охотского побережья и далее, от горного узла Сунтар-Хаята, раскидывающаяся во все стороны, заполненная такими первоклассными селеносными хребтами, как Баргузинский, Кодар, Удокан, Становой, Джугджур, Верхоянский, Черского, Колымский, Корякский, продолжается по ту сторону Берингова пролива, включая в себя не менее богатые селевыми явлениями хребты Аляскинский, Брукса, Маккензи.

Скалистые и Каскадные горы, Сьерра-Невада, Большой Бассейн — громадная территория, на которой селевые процессы происходят повсеместно. Особо известны лахары Лассен-Пика; гляциальные сели массивов Бейкер, Глейшер-Пик, Рейнир, Адамс, Худ; подпруженные ледниками прорывающиеся озера Кенайского полуострова, гор Чугач, Святого Ильи, Врангеля, Берегового хребта, среди которых такие феномены, как озера Джордж и Тальсеква; знаменитые селевые потоки гор Сан-Габриель, посягающие на Лос-Анджелес; наносоводные, грязевые и грязекаменные потоки Сьерры-Невады и возвышенностей и хребтов Большого Бассейна: Уайт-Маунтинс, Стиллутер, Стинс, Руби; потоки гор Уосатч, атакующие среди прочих объектов цивилизации город Солт-Лейк-Сити. Даже считавшийся неселевым хребет Титон в Средних Скалистых горах в 1941 г. сделал свой единовременный вклад не менее чем сотней грязекаменных потоков.

Анды Центральной и Южной Америки — выдающаяся селевая территория земного шара. На вулканах Гватемалы, Коста-Рики, Эквадора и Чили бушуют лахары, знаменитая Кордильера-Бланка известна страшными уаскаранскими катастрофами

и другими селевыми сюрпризами, подпруженные ледниками озера прорываются на пространстве от экватора до Патагонии, ливневые грязекаменные уайкос (окончание «с» говорит о множественном числе) грохочут во всех трех Кордильерах — Западной, Центральной и Восточной.

Альпы настолько освоены человеком, что там даже малые сели переносятся очень болезненно, а катастрофические сразу попадают в разряд национальных бедствий. Селевые явления здесь разнообразны, активны и повсеместны. Можно утверждать, что над Французскими, Швейцарскими, Итальянскими, Австрийскими Альпами непрерывно слышится грохот грязекаменных потоков.

Большой Кавказ — район бурного протекания селевых процессов. Черные грязекаменные потоки в его юго-восточной части — выдающиеся во многих отношениях. В Приэльбрусье, Сванетии, Дагестане, Казбекском районе селевые потоки время от времени будят эхо почти во всех ущельях.

Огрызаются селями и приполярные горы Антарктиды, острова Советской Арктики, Канадского Арктического архипелага, Гренландии, не говоря уже об Исландии, которую йёкудльлаупы и гляциально-вулканические процессы превратили в остров величайшей селевой напряженности.

Залесенность хребтов, даже полная, часто не может служить гарантией отсутствия селевых явлений, и это подтверждают примеры Карпат, Хамар-Дабана, Сихоте-Алиня, Аппалачей.

Селевые потоки настолько вошли в жизнь населения Малайского архипелага и Японских островов, что Индонезию можно назвать страной лахаров и банджиров *, а Японию — ямацунами и тонсири *.

Не избавлены от селей и острова в океане: в 1861 г. селевая катастрофа разразилась на Сейшельских, а в 1886 г. грязекаменный поток прошел через Порт-Стенли на Фолклендских.

В этом беглом обзоре я не упомянул о Пиренеях, Апеннингах и Балканах, об Эфиопском нагорье и Драконовых горах, о мексиканских Сьерра-Мадре и Гвианском нагорье, о горах Австралии, Новой Гвинеи, Новой Зеландии, Мадагаскара и Цейлона, о хребтах в пределах Турции, Ирана и полуостровов Аравийского, Индокитая, Корейского и о многих других объектах. Так вот, все они тоже селеопасны, и их потоки тамошним жителям представляются самыми ужасными на свете.

Горы — горами, но во многих лишь слегка всхолмленных местах также случаются сели, например, в Киеве или в оврагах и балках Средне-Русской возвышенности... Я останавливаюсь, иначе мы с вами придем к выводу, что сели вообще повсеместны и вездесущи.

* Местные названия селевых потоков.

3. АНТОЛОГИЯ ЗНАМЕНИТОСТЕЙ

Слово „антология“ понимается нами в прямом смысле, как собрание самых интересных и типичных экземпляров.

*Г. Мак-Кормик, Т. Аллен, В. Янг.
Тени в море*

Малая Алматинка, 1921

Лето 1921 г. для Заилийского Алатау было на редкость дождливым. 7 июля было тепло, в Алма-Ате, тогда еще городе Верном, температура достигла 30 °С, а нулевая изотерма поднялась до 5600 м. На следующий день с севера произошло вторжение холодного воздуха, сопровождавшееся ливнями. Вот как описывает свои метеорологические впечатления алма-атинский краевед В. Д. Городецкий:

„Горы с утра были закутаны густым слоем облаков... К полудню тучи еще более сгустились и прошла гроза с сильным дождем. После полудня опять был короткий ливень с чрезвычайно крупными каплями. ...Я обратил внимание на необычное для летнего периода низкое расположение туч: горы были закрыты совсем начинающая с высоты 1200 м. К горам шли тучи низко, черные, густые, и так быстро, словно осенью. ...Вскоре прошел опять ливень с редким градом, затем опять гроза и ливни, короткие и сильные, причем два из них отличались поразительной силой“.

В этот день очень сильные дожди излились над верхней зоной всего Заилийского Алатау, но главные события произошли в урочище Кокашик в верховьях Правого Чимбулака.

Метеорологическая станция в Алма-Ате (848 м над уровнем моря) отметила в этот день 24 мм осадков, а заведующий санаторием в Медео (1600 м) доктор Н. К. Киселев около 8 ч вечера, перед тем как селом был уничтожен дождемер, зафиксировал 72 мм. Было замечено, что те речки, верховья которых не заходят в альпийскую зону, не подверглись какому-либо необычному воздействию; в то же время в русле Малой Алматинки до Сарысай не было следов сея. Следовательно, ливневое пятно, в центре которого слой осадков был не менее 100 мм и средняя интенсивность не ниже 2 мм/мин (известно, что первая селевая волна прошла через 45 мин после начала основного ливня), накрыло самые верховья притоков Малой Алматинки: Кимасар, Сарысай, Чимбулак, Чертово Ущелье и Горельник. Поскольку ливень был очень сильный и короткий, то стремительно сброшенные с альпийских лугов дождевые воды образовали в русле Малой Алматинки крутую паводковую

волну, которая и докатилась до города к 9 ч вечера. Река вышла из берегов, затопила ближайшие улицы, но особого вреда не причинила. На этом бы все, видимо, и закончилось, но в верховьях Правого Чимбулака, там, где сейчас зияет глубокий селевой врез, в широкой крутой ложбине, покрытой лугами и огражденной с боков скалистыми гребнями, с которых спускаются шлейфы осыпей, все было подготовлено к запуску в действие сдвигового селевого процесса. Подтопленная во время ливня и без того обильно напоенная влагой рыхлообломочная порода пришла в движение. Мощный грязекаменный вал по руслам Чимбулака, Сарытая и Малой Алматинки через 20 мин после паводковой волны вышел к Медео и затем к городу. Следом за первым прошло еще несколько подобных валов. Движение селевой массы, следовавшей за ними, как это всегда бывает, носило волнообразный характер. В. В. Епанечников насчитал до 80 отдельных волн.

Общее количество перемещенной грязекаменной массы оценивается приблизительно в 2 млн. м³, а максимальный расход, видимо, достиг 4,5—5 тыс. м³/с — цифры, полученной специальной экспедицией, проводившей работы сразу после катастрофы.

Через город грязекаменный поток шел 200-метровой полосой. Главное направление его движения совпало с прежним руслом Малой Алматинки, которое было засыпано при основании и планировке города Верного. Поток пересек головной арык (ныне проспект Абая), Пушкинскую и Нарынскую (Красина) улицы и вышел на Копальскую (Карла Маркса), по которой смещался вниз, постепенно истощаясь и замедляясь. Два других ответвления потока проследовали по руслам Малой Алматинки и Весновки.

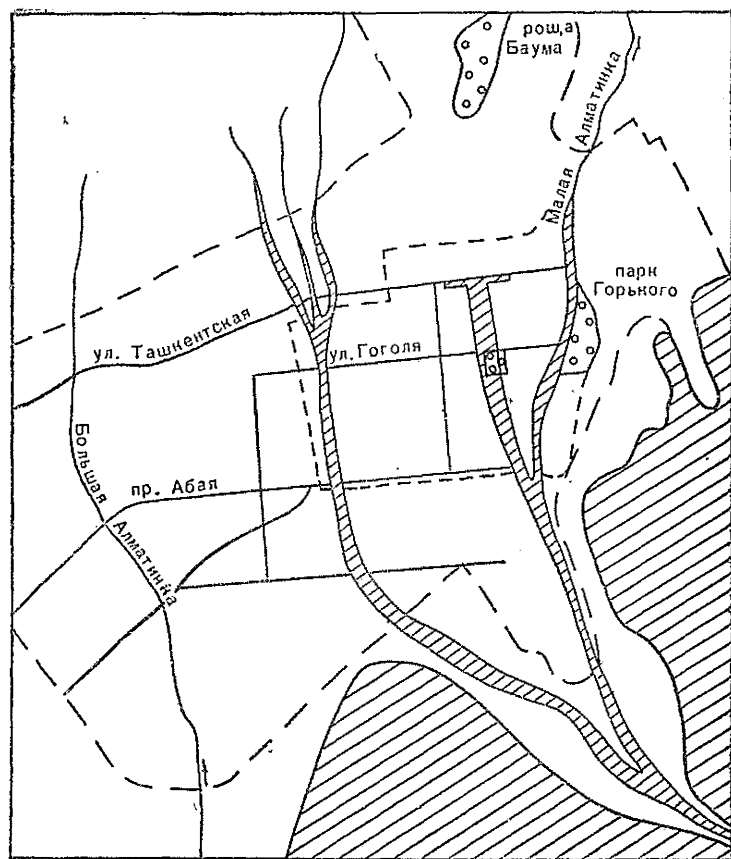
Приведу впечатления очевидцев о событиях в городе. Первая цитата принадлежит горному инженеру В. В. Епанечникову, остальные — натуралисту В. Н. Шнитникову.

„Рев воды, гул перекачиваемых камней, треск разрушаемых зданий, грохот сдираемых железных крыш, огромные искры, вероятно, от сталкивающихся камней, еще издали предупреждали о приближении ее, и вот лавина, состоящая из воды, грязи, гальки, огромных валунов, стволов деревьев и обломков разрушенных зданий, ринулась на город... По руслу Алматинки и улицам города плыли целые дома, и крики о помощи уносимых водой людей придавали особую жуткость картине всеобщего разрушения“.

„Самые сильные разрушения поток причинил в верхней части города — на Пушкинской и Нарынской, где были совершенно уничтожены и исчезли с лица земли не только почти все дома и все сады с огромными старыми деревьями, но и сама местность стала неузнаваемой. На месте улиц, садов, огородов оказались колоссальные промоины, овраги, загроможденные огромными каменными глыбами и тысячами более мелких валунов, принесенным потоком из гор. На месте бывшей Копальской улицы во всю ее ширину образовался на большом

протяжении глубокий лог. На высоте парка грязь уже начала останавливаться, и вся западная половина парка, Гоголевская и Торговая (М. Горького) улицы были покрыты слоем полужидкой грязи больше метра толщиной, там она и осталась навсегда.

...Интересный случай произошел с другим домом: он был сорван потоком с места, но не разрушен, а подхвачен целиком



Алма-Ата, город Верный и селевой поток 1921 г.

и унесен. Дом этот видели многие жители Копальской улицы в то время, когда он плыл по ней вниз с освещенными окнами, через которые видны были его обитатели. Этот дом проплыл по Копальской до парка, затем свернул на Сергиопольскую (М. Тулебаева) и наконец остановился на ней на пустом месте с правой стороны двумя-тремя кварталами ниже Торговой. Там

я этот дом видел через несколько дней уже сам. Таких домов, уплывших и остановившихся где попало, в городе было несколько.

...Живущие на бывшей Копальской улице, т. е. на самом берегу грязевого потока, рассказывали мне, что разговаривать там было невозможно, даже вплотную приближая ухо к говорившему, вернее — кричащему из всех сил собеседнику.

...Когда наутро жители города стали подходить к местам наибольшего разрушения, то впечатление от того, что они увидели, было настолько потрясающим, что никто даже не обменивался ни одним словом. Все молча, подолгу стояли на одном месте, совершенно подавленные, стараясь припомнить, что же было раньше на месте лежащего перед их глазами каменного хаоса или преграждающей путь глубокой промоины“.

Дуруджи, Кишчай и его соседи

Юго-западный склон Главного Кавказского хребта в пределах бассейна Алазани известен как район формирования классических грязекаменных потоков. Развитие селевых процессов здесь связано в первую очередь с распространением глинистых сланцев.

В верховьях знаменитой селевой реки Дуруджи расположены две основные группы очагов общей площадью около 6 км² — Шави (Черная) и Тетри (Белая) Дуруджи.

Очаги Шави-Дуруджи явились объектом изучения грузинских селевиков. Здесь, у водораздела, высится массив, внешнее впечатление от которого точно передает его название — Шавп-Клде (Черная скала). Обнаженные крутые склоны иссечены рытвинами и кулуарами, очерчены в верхней части изломанной линией водораздела, более чем с километровой высоты они устремляются как к фокусу к центральному ущелью, которое служит местом сноса и хранения рыхлообломочной породы. Именно здесь кончают свой путь оползни, обвалы и мелкие сели, формируя ПСМ*, и здесь же со временем создаются критические условия, приводящие в действие сдвиговый** селевой процесс. Оголенные селеносные склоны приводораздельной части бассейна как бы выступают из сплошного лесного массива, простирающегося от подножия гор до высоты 2200—2400 м. Леса, в основном буковые, здесь великолепны.

Очаги в верховьях Тетри-Дуруджи во многом сходны с описанными, однако их отличают более активное пожирание лесных и пастбищных угодий, большая мощность ПСМ, а также белесый оттенок разрушенной породы, который и позволил назвать эту Дуруджи белой. Выходящие отсюда грязекамен-

* Потенциальный селевой массив. См. этюд 10.

** Один из типов селевых процессов. См. этюд 9.

ные потоки имеют цвет, который по сравнению со зловещим интенсивно черным цветом потока из Шави-Дуруджи, хотя и условно, может именоваться белым.

Селевые потоки из Шави- и Тетри-Дуруджи в случае синхронной „сработки“ объединяются и на протяжении 4,5 км проносятся в узком и глубоком песчаниковом каньоне, из которого и изливаются на постепенно расширяющийся конус выноса. На этом конусе, пытаясь отгородиться от селевых потоков насыпной дамбой, лежит прекрасный город Кварели.

Из 76 лет, с 1888 по 1963 г., одиннадцать (1888, 1899, 1903, 1906, 1922, 1934, 1949, 1956, 1957, 1961, 1963) отмечены выходом грязекаменных потоков на конус выноса. Что же касается мелких селей, то в районе очага они проходят ежегодно и неоднократно. Только за 1961—1967 гг. Г. М. Беручашвили и его сотрудники зарегистрировали 150 селей.

Вот краткие сведения о некоторых селевых потоках:

23 июня 1899 г. Разрушено 25 домов, принесена глыба весом до 160 тонн.

30 августа 1906 г. Погибло 56 человек.

2 июля 1949 г. Объем селя около 0,8 млн. м³, прошло два вала, второй более мощный. В результате почти лобового удара поток прорвал каменную дамбу и разделился на две ветви. Правая, основная, 3—4-метровым валом проследовала по руслу Дуруджи, левая же разрушила стены древней крепости и с расходом около 100 м³/с устремилась в город. Здесь сель разрушил несколько домов и покрыл площадь 30 га. Поток захватил из крепости и перенес на трехкилометровое расстояние рояль, которым после всего этого можно было пользоваться по назначению. Этот интересный случай впоследствии часто фигурировал в обсуждениях динамики селевых потоков.

14 сентября 1961 г. В створе „Грузгипроводхоза“ (перед выходом из каньона на конус выноса, 8 км выше Кварели) объем грязекаменного потока оценен в 1,2 млн. м³, максимальный расход — в 740 м³/с, максимальная измеренная плотность достигла 2230 кг/м³.

Характеристики двух селевых потоков 1963 г. были измерены в постоянном створе „Грузгипроводхоза“ и у города Кварели:

	Объем, млн. м ³		Максимальный расход, м ³ /с	
4 июля	1,4	0,57	700	150
25 июля . . .	1,6	0,74	1250	450

Как следует из приведенных цифр, на 8-километровом участке в обоих случаях отложилось немного больше половины селевой массы, прошедшей через верхний створ.

Селевые очаги в бассейнах Кишчай, Шинчай, Курмухчай — это глубокие воронки, отгороженные друг от друга острыми, то зубчатыми, то выровненными, скалистыми гребнями и сообщающиеся с внешним миром через сумрачные глухие теснины и

каньоны. Склоны воронок исчерчены бороздами и рытвинами, с уступов и обрывов свисают струи водопадов. Кругом, куда ни взглянешь, — острые вершины, вздымающиеся кручи, по которым со звоном осыпаются черные сланцевые плитки. Все изломано, неустойчиво, подвижно. В ущельях расширения, заполненные обломочной породой, сменяются труднопроходимыми теснинами. Снизу селеносный пояс обрамлен дубово-буковым лесом.

В бассейне Кишчай выделяются три основные группы селевых очагов — Дамарчик, Сарыгуней и Чухадурмаз. Имеются отрывочные сведения о селях на Кишчае в XVII—XIX вв. В нашем веке за первые 60 лет существенные грязекаменные потоки 12 раз выходили на конус выноса. Мелкие селевые потоки здесь, в пределах очагов, случаются после каждого приличного дождя, т. е. несколько раз в году.

Н. Н. Пыльцов так описывает свои впечатления о прохождении селевого потока по Кишчаю в ночь с 7 на 8 июля 1901 г.: „В 12 ч я вышел на балкон, обращенный к Кишскому ущелью. Ливень прошел. В воздухе была полная тишина. Вдруг я был поражен каким-то непривычным для слуха шумом, доносившимся из Кишского ущелья; впечатление получалось такое, как будто к городу приближался поезд, только шум был гораздо сильнее... и сопровождался каким-то шуршащим грохотом; я понял, что по руслу Кишчая, расположенному у самого города, идет селя; по мере приближения его к грохоту присоединились и какие-то странные звуки: точно где-то очень далеко ударялись друг о друга металлические листы, и, если только можно так выразиться, в воздухе стоял какой-то металлический стон. По мере приближения селя по листьям стоящих в саду тополей я скорее видел, чем осязал, колебание воздуха. Селя прошел. Наступила могильная тишина. Минут через десять издали снова послышался шум приближающегося поезда и в постепенной последовательности повторились вышеописанные явления, за исключением тишины: проснувшееся население в ужасе высыпало на улицы, и, как при всякой тревоге в восточном городе, началась пальба из ружей и револьверов. Население расположенных у реки кварталов бросилось на склоны ближайших гор, побросав все имущество. Панический ужас охватил всех... И действительно, кто присутствовал при явлении селя в темную, глухую ночь, тот только поймет то тоскливое чувство полного бессилия, смешанного с паническим страхом, которое подавляет человека перед подобного рода ужасающим явлением. В промежуток времени от 12 ч ночи до 4 ч утра по руслу реки Кишчай прошло от 15 до 20 грязекаменных валов селя. Вся долина Кишчая утром 8 июля представляла собою уныло-зловещую картину: все, что видел глаз, было покрыто серой грязью; не было видно ни кустика, ни травинки; не было видно даже камней, которые уже потом выделились под влиянием дождей из грязи; все было безжизненно, тоскливо и ровно; впечатление получалось какое-то гнетущее.“

26 ноября 1903 г. Н. Н. Пыльцов на общем собрании Кавказского отдела Русского географического общества указывал, что за последние 20 лет грязекаменные потоки Шинчай частично или полностью уничтожили четыре селения: Ашага-Гейнюк, Ашага-Лански, Тала и Шин.

В августе 1910 г. сель стер с лица земли селение Башгейнюк со всем населением.

Грязекаменный поток 27—28 июля 1936 г. подробно был описан М. С. Гагошидзе. Ливень, измеренный недалеко от устья реки Дамарчик, начался 27 числа в 20 ч 30 мин. В течение 70 мин выпало 43 мм. В 21 ч 10 мин послышался все усиливающийся грохот селевого потока. Второй ливень начался в 1 ч 20 мин ночи, за 30 мин вылилось 24 мм осадков. Последовательно прошли два селевых потока. Дорогу Шеки (Нуха) — Закаталы передний вал селя пересек около 23 ч. На 5-километровом участке выше дороги скорость перемещения фронта потока составила 2,2 м/с. Максимальный расход при выходе селя на конус выноса оценен в 530 м³/с, а объем излившейся на конус селевой массы в 2,5—3,0 млн. м³.

В ночь с 14 на 15 августа 1955 г. над бассейнами Шинчай и Кишчай разразился ливень. Вблизи устья реки Дамарчик за 110 мин выпало 33 мм осадков. Грязекаменные потоки устремились вниз по руслам обеих рек. Передний вал на Кишчае достигал высоты 6 м, на Шинчае — 12 м. Сильный грохот был слышен на расстоянии 12 км. Предупрежденные им жители селения Ашага-Шабалыт на Шинчае вовремя покинули свои жилища. Селевая масса из Шинчая двигалась по конусу выноса грязевой рекой, ширина которой ниже селения Шин достигала 2—3 км. Объемы грязекаменной массы, выброшенной из ущелий Кишчай и Шинчай, приближенно оценены в 4—4,5 и 12—14 млн. м³.

3 сентября 1958 г. вновь прошли сели по Шинчаю и Кишчаю:

	Объем, млн. м ³	Максимальный расход, м ³ /с	Плотность, кг/м ³
Кишчай . . .	4,2	730	1800—2260
Шинчай . . .	1,7	670	1700—1960

В первые 70 лет XX в. грязекаменные потоки из Курмухчай трижды пересекали дорогу Нуха — Закаталы: в 1923, 1926 и 1963 гг. 25 июля 1963 г. сели последовательно вышли из трех ущелий: Буланлыгчай, в верховьях которого расположены основные селевые очаги, Ахчай и Кунахайчай. Первый, самый крупный поток прошел 20 км, оставив на своем пути 1,6 млн. м³ селевых отложений. Самая крупная из перенесенных глыб имела объем 32 м³. Высота передового вала достигала 6—8 м.

6 сентября 1972 г. ливень охватил громадную площадь и повсеместно вызвал прохождение селей. На наших трех объек-

тах характеристики селевых потоков, вышедших из гор, оказались такими:

	Объем, млн. м ³	Максимальный расход, м ³ /с	Плотность, кг/м ³
Курмухчай . . .	2,6	850	1800—2300
Шинчай . . .	1,2	600	1850—2200
Кишчай . . .	1,2	320	2000—2200

Тойчисай, 1962

Юго-западная лопасть Гиссарского хребта, как бы расплываясь, зарывается в рыхлые покровы Приамударынской равнины. Здесь, в междуречье Кичик-Урядары и Таркапчигая, раскинулось волнистое низкогорье с широкими продольными долинами, перечеркнутое асимметричными известняковыми куэстовыми грядами в направлении, заданном осью Гиссарского хребта в горах Байсунтау. Это район распространения красно-пестроцветных пород, глин, мергелей, песчаников, конгломератов, район обнаженных сильно эродированных склонов и чахлой эфемерной растительности.

30 апреля короткий сильный ливень прошел узкой полосой над районом перевала Акратат и далее вдоль долины Тойчисая.

В первой половине июня мы с Э. Д. Чолпанкуловым — сотрудники Института водных проблем и гидротехники Академии наук Узбекистана, — более десяти дней проведя в седле, посетили все закоулки части низкогорья, несущей следы этой сильной паводковой катастрофы. Несмотря на то что прошло больше месяца, местные жители все еще находились под глубоким впечатлением разгула стихии.

В ночь с 29 на 30 апреля выпало около 10 мм осадков, которые промочили и без того сырую землю на 7—8 см. Перемещаясь от перевала Акратат на запад, дождь усиливался, чтобы достичь кульминации в верховьях Тойчисая. В районе метеорологической станции Акратат ливень начался в 12 ч 12 мин (местное среднее солнечное время), его интенсивность в период с 12 ч 45 мин до 13 ч 19 мин не уменьшалась ниже 0,24, иногда превышала 1,0 и в среднем за 56 мин составила 0,49 мм/мин. Наблюдатель утверждал, что потоки дождевой воды почти сплошь покрывали травянистый склон ниже станции. Водосбор „Садовый“ (3,3 км²), выходящий своей верхней половиной на приводораздельное плато у метеостанции, отмечен максимальным модулем стока (максимальный расход, деленный на величину площади водосбора) — 4—5 м³/(с · км²). Мощные паводки прошли вниз по Акрататсаю и Консаю, левым притокам Кичик-Урядары, но главные события разразились в бассейне Тойчисая, над верховьями которого интенсивность ливня должна была быть не менее чем в 4 раза выше

зарегистрированной у перевала Акрабат, чтобы вызвать те гидрологические последствия, которые имели здесь место.

В верховьях Тойчисая лежит котловина Курганташ, на правом склоне которой расположен небольшой одноименный кишлак. Ливень, выпавший здесь, по словам местных жителей, был из ряда вон выходящим. Град, которым сопровождался дождь, также был выдающимся. Продавец кишлачного магазинчика утверждал, что лично взвешивал градину и получил ошеломляющий результат: 200 г.

Хлынувшие отовсюду мутные воды через узкий проход в скалистой гряде, где протискивается русло, устремились вниз по ущелью. Обычно сухие русла многочисленных больших и малых саев (сай — среднеазиатское название ложбин, логов, ручьев и мелких речек; в Монголии — сайр, в Туркмении и Азербайджане — чай) со всех сторон сбрасывали в главное русло Тойчисая свои вспененные и мутные воды. Через 7 км растущая селевая волна прорвалась через скалистые ворота в куэстовой гряде Сакрытма-Элликбаш, возвышающейся на 200 м над окружающими холмами, и покатила вниз по Тойчисаю мимо селений Тойчи, Агиртма и Кызылча на равнину. В это же время паводковая волна меньших размеров неслась по левому притоку Тойчисая Танхазсаю. Представление о максимальных модулях стока, полученных в результате тщательного обследования следов селей, дает следующая таблица:

Сай	Курганташ	Ходжаисап	Атчи
Площадь бассейна, км ²	5,2	13	5,9
Максимальный модуль стока, м ³ /(с · км ²)	22—27	9—11	17—21

Плотность суспензии в потоках, видимо, была велика, судя по соотношению слоя отстоявшейся воды и осевшей глины (со слов свидетелей), она достигала 1200 кг/м³. В низовья Тойчисая были перенесены большие массы средней и мелкой плохоокатанной гальки.

Чирчик, Ангрен, 1959

В ночь с 7 на 8 апреля по многим рекам и саям Чирчик-Ангренского бассейна в Западном Тянь-Шане прошли паводки и сели.

Дождь начался в ночь с 5 на 6 апреля. Основные осадки выпали в утренние часы 6 апреля. На многочисленных саях были отмечены небольшие паводки, а на таких крупных реках, как Чаткал, Пскем, Коксу, Акбулак, Аксаката и Ангрен, несколько повысился уровень воды. 7 апреля в предгорьях и на прилегающей равнине дождь шел с перерывами и значительно

уступал предшествующему по интенсивности. Сильные дожди были лишь далеко в горах — в верховьях Пскема, Чаткала, Сандалаша и Ангрена. Расходы воды в крупных реках бассейна не выходили за пределы обыденных.

В ночь с 7 на 8 апреля вновь выпадали ливневые дожди, но их ни в коей мере нельзя было назвать из ряда вон выходящими. Тем не менее реакция на них была ошеломляющей: по Чирчику, например, прошел паводок, о котором крупнейший знаток гидрологии Средней Азии В. Л. Шульц сказал, что он даже „не допускал возможности формирования на реке Чирчик дождевого максимума столь большой величины“.

Исключительность ситуации определили также следующие разнообразные факты:

1) 23 и 24 марта, за две недели до описываемых событий, в Чирчик-Ангренском бассейне выпали очень сильные дожди, близкие к вышеописанным по слою и интенсивности, которые, однако, не дали даже заметной доли эффекта дождя 8 апреля;

2) дождь 7—8 апреля, вызвавший сильные паводки в окраинной полосе гор, не повысил сколько-нибудь необычно уровень воды на реках внутреннего Западного Тянь-Шаня. Максимальные расходы на Ойганге, Майдантале, Сандалаше, Терсе, Верхнем Чаткале оказались даже ниже летних половодных максимумов того же года.

Таким образом, далеко не на всей территории, где выпал дождь, формировался исключительно интенсивный дождевой сток. Последний наблюдался лишь в сравнительно небольшом районе, включающем водосборы Ахбулака, Аксакаты, Нижнего Пскема, Нижнего Угама, — на пространстве радиусом всего 40 км с центром в Чарвакской котловине;

3) гидрограф паводка даже на такой крупной реке, как Чирчик, имеет ярко выраженный пиковый характер, присущий обычно дождевым паводкам на малых водотоках. Столь резкий и значительный подъем уровня воды можно объяснить очень быстрым сбрасыванием дождевых вод с поверхности водосбора в русловую сеть;

4) крупный ливневый паводок был отмечен на верхнем Ангрене, в то время как заснеженность его бассейна достигала 96%. Это заставляет предполагать немыслимое: формирование интенсивного дождевого стока на Ангренском плато, почти сплошь покрытом снегом;

5) к горному массиву Большой Чимган (3309 м) примыкают водосборы Мазарсая и Чимганки (бассейн реки Чирчик), в пределах которых широко распространены мощные толщи рыхлообломочных отложений. Дождевые паводки на этих речках всегда растянуты и невысоки. Тем не менее именно на этих саях 8 апреля наблюдались значительные кратковременные паводки;

6) на низко расположенных водосборах Чирчик-Ангренского бассейна в ночь с 7 на 8 апреля вообще не наблюдалось ничего необычного.

Все перечисленные несуразности объясняются исключительно просто, хотя имевший место феномен в своем роде и уникален: сильный ночной дождь кое-где совпал с понижением температуры воздуха и образованием на поверхности снежного покрова ледяной пленки, по которой холодные дождевые воды без ощутимых потерь сбрасывались в русловую сеть.

Выше 2000 м горы были покрыты снегом. Днем 7 апреля было сравнительно тепло. Снеготаяние и предшествовавшие дожди сильно увлажнили толщу снега. Вечером и ночью температура резко понизилась, что привело к обмерзанию смоченной снежной поверхности. Даже через несколько дней после событий 8 апреля на снежных полях можно было видеть непривычный рисунок четко выраженной эрозионной сети из крупных, мелких и мельчайших борозд. 18 апреля мы обнаружили ее на склонах массива Большой Чимган (на высоте от 1700 м до вершины), а 24 апреля — на снежниках горы Кызылнура (3267 м). Приблизительно в это же время подобную картину наблюдал с вертолета В. Л. Шульц на Ангренском плато.

Таким образом, дождевой сток в бассейне Чирчика сформировался в основном в высокогорной зоне (выше 2000 м) периферийной части гор, на снежных полях общей площадью около 2500 км². Средний сток с этой поверхности составил 54 мм, что хорошо согласуется с величинами слоя осадков, зафиксированными на дождемерных пунктах в пределах этой же территории.

Потоки воды, сбрасываемые с заснеженных склонов на обнаженные участки и в русла саев и рек, увлекли с собой массу рыхлых отложений. Поэтому вода в реках 8 апреля была очень насыщена наносами. На Чирчике максимальная величина плотности суспензии при расходе более 2000 м³/с составила 1110 кг/м³. Шульц полагал, что „и по кратковременности, и по содержанию наносов паводок, прошедший по реке Чирчик 8/IV 1959 г., можно считать селевым“. Но где лежит истинная граница между паводками с определением „селевой“ и без оно-го? И нужна ли она?

Горы Сан-Габриель и город Лос-Анджелес

Сан-Габриель в Калифорнии — это острые вершины и узкие хребты между каньонами. У фронта их нижнего яруса, отделенная от него неширокой продольной одноименной долиной с поселками Монроуз и Ла-Кресента, лежит невысокая (до 955 м) гряда — горы Вердуго. У их северного подножия, прижатое мощными конусами выноса потоков, вырывающихся из каньонов хребта Сан-Габриель, проходит широкое и глубокое русло, затем оно круто поворачивает и протискивается между горами Вердуго и холмами Сан-Рафаэль и впадает в речку Лос-Анджелес недалеко от городка Глендейл. Восточнее долины Сан-Габриель расширяется. Здесь у самого подножия первой ступени гор расположены селения Монровия, Азуса, Глен-

дора. Ниже всего этого раскинулось обширное пространство, занятое апельсиновыми и лимонными насаждениями, фруктовыми садами, виноградниками, городками, поселками и предместьями Лос-Анджелеса и перерезанное бетонными лентами дорог и трамвайными линиями.

Так было в 1934 г., до того как произошла „новогодняя“ селевая катастрофа. Лос-Анджелес в то время имел около 1,3 млн. жителей. В настоящее время это один из крупнейших городов мира с многомиллионным населением; включив в себя все перечисленные городки и поселки, заполнив собой все доступное пространство от океана до гор, он буквально вползает в горные проходы и долины.

Дожди в этом районе короткие, нерегулярные, ограничены холодным временем года. Но случаются и грандиозные ливни. Такой дождь шел 30 и 31 декабря 1933 г. и 1 января 1934 г. В целом на склоны гор Сан-Габриель выпало от 250 до 500 мм осадков. Селевые подвижки в бассейнах начались 31 декабря вскоре после полуночи. Интенсивность ливня медленно нарастала и достигла максимума около 11 ч 45 мин утра. Одновременно наносоводные и грязекаменные потоки из Холз-Каньона и Пикинз-Каньона прошли через Монроуз и Ла-Кресенту. Вот что рассказывает свидетель, увлеченный потоком в Пикинз-Каньоне, но спасшийся.

„Около 11 ч 40 мин мы услышали неясный шум, доносившийся со стороны каньона. Прежде чем мы успели выйти на крыльцо, поток воды пронесся через дом: всех нас унесло далеко вниз по каньону. Затем с более высокого места мы наблюдали, как стена воды около 15 футов (4,6 м) высотой с ревом пронеслась по каньону, унося с собой дома, деревья, валуны и людей“.

Поток проследовал по руслу Лос-Анджелеса в океан и окрасил его в коричневый цвет в радиусе до 20 км. В основном пострадали Монроуз, Ла-Кресента и Глендейл, расположенные по пути селевых потоков, сформированных в бассейнах, где растительность была уничтожена пожаром в ноябре 1933 г.

Ситуация повторилась через 35 лет. На этот раз в центре событий, охвативших весь район, оказались малые (0,2—1,1 км²) селевые бассейны, расположенные над городом Глендора на высотах от 270 до 430 м. В июле и августе 1968 г. здесь сгорел кустарник, с 18 января 1969 г. непрерывно шел дождь, а 22-го над выжженными водосборами вылился сильнейший ливень (за час выпало 33 мм). Грязекаменные потоки затопили жилые районы города и повредили 175 зданий.

Тироль. Краткая селевая история

Альпы — это, наверное, первое и главное место на Земле, где цивилизация вплотную столкнулась с селевыми потоками. Поэтому проблема „человек и сели“ имеет здесь свою драма-

тическую историю, богатую событиями. В качестве примера территории, типичной для Альп в селевом отношении, я выбрал австрийскую провинцию Тироль в ее теперешних границах, где люди и селевые потоки сосуществуют многие и многие века. Следует помнить, что название долин в Альпах, и в частности в Тироле, чаще всего не совпадает с названием рек, текущих по дну этих долин.

Исторические хроники содержат сведения о селевых катастрофах лишь за последние несколько столетий. Тем не менее до нас дошло известие о громадной грязекаменной лавине, выброшенной в 600 г. из ущелья Ланбах в долину Инна у селения Швац.

1111 г. Селевые потоки из Шлейницбаха и Графенбаха почти полностью уничтожили Лиенц.

1347 г. Бреттервандбах изрыгнул сель, разрушивший Матрай.

1559 г. Четыре последовательных потока из Оксельбаха практически уничтожили селение Шлиттерс в Циллертале. Многие дома были залиты селевой массой до второго этажа, а некоторые и полностью. Была заполнена часть существовавшего тогда здесь озера.

1627 и 1669 гг. Ланбах своими потоками вновь посягал на Швац.

1701 г. Селение Флаурлиннг в долине Инна завалено метровым слоем грязекаменной массы из Канцингбаха.

1749 и 1761 гг. Эцталь. Потоки из Хайрлахбаха и Фарстринне разрушили в Умхаузене 80 домов, а сель из Фишбаха нанес значительный ущерб в Ленгенфельде.

1772 г. Грязекаменный поток из Фендлербаха учинил разрушения в Риде в долине Инна.

1771 и 1782 г. В районе Инсбрука бесчинствовали потоки из Румербаха и Герольдбаха.

1789 г. Матрай вновь завален селевой массой из Бреттервандбаха.

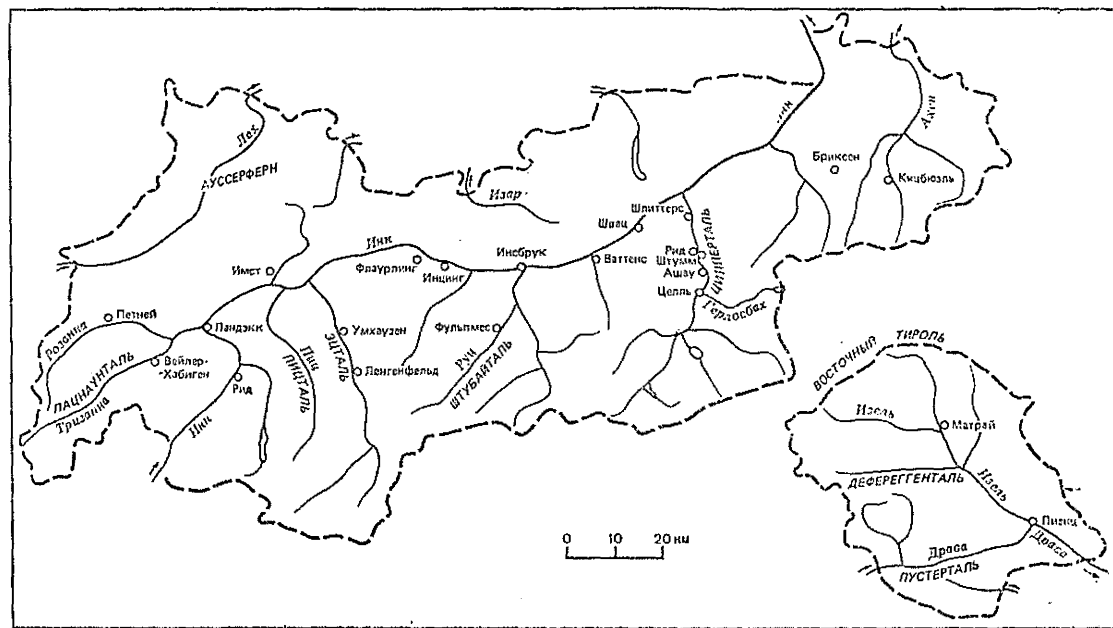
1807 г. Снова Ланбах и Швац, Фишбах и Ленгенфельд. Сель из Энтербаха уничтожил в Инцинге 45 домов и 72 га возделанных земель. Пострадало селение Фульпмес в Штубайтале.

1820 г. Новое покушение Оксельбаха на Шлиттерс в Циллертале.

1823 г. Селевыми потоками из Арнбаха, Абфальтербаха, Кристейнбаха, Хризантенбаха, Дебантбаха, Филлгратенбаха, Эрлбаха, Маргаретенбаха опустошена вся долина Дравы в пределах Восточного Тироля.

1846 г. Ауссерферн. Сели разрушили селения Гёфеи и Нессельвэнгле.

1879 г. Новые катастрофы в Восточном Тироле. Вновь разрушен Матрай. Грязекаменные потоки вырвались из Цаухенбаха, Графенбаха, Варченбаха, Лаппахербаха, Сталлербаха,



Схематическая карта австрийской провинции Тироль, страны высоких гор, полноводных рек и селевых потоков.

Хопфгартнерграбена, Бруггеральмбаха, Тегишербаха, Фейстримбаха.

1882 г. Эцталь. Сели из Эдербаха и Заутнербаха. Вновь пострадали почти все долины Восточного Тироля.

1885 г. Крупные селевые потоки в Эцтале, Пинцтале и в долине Инна выше Инсбрука.

1887 г. Ридбах в Циллертале выбросил 0,44 млн. м³ селевой массы. Соседний Кальтенбах отмечен потоком, прошедшим через середину поселка Рид. Сели из Ангерербаха и Ашауербаха оставили в Ашау 0,50 млн. м³ отложений.

1891 г. Опять Ридбах, Кальтенбах, Ашауербах. К ним присоединился Арубах, атаковавший Штумм.

1901 г. Снова селевая катастрофа в Аусерферне.

1908 г. Тяжелые катастрофы в долине Инна в районе Инсбрука и ниже по течению. Мощным селом отмечен Герольдбах. В Циллертале Хазельбах и Хартербах выбросили соответственно 0,20 и 0,30 млн. м³ грязекаменной массы. Сель из последнего отодвинул русло Циллера на протяжении 6,5 км на 200 м к западу, создав большое озеро. На дно долины Мэрценбаха из Экклбаха выброшена масса объемом 0,20 млн. м³.

1940 г. Гэнсбах обрушил грязекаменный поток на город Кицбюэль.

1946 г. Селевой поток из Хинтингерграбена в Бриксентале разрушил часть селения Хаслау, а из Лаутербаха — половину поселка Бриксен.

1965 г. Селевые катастрофы разразились повсеместно. Пострадали районы Инсбрука, Имста, Ландэка. В Восточном Тироле опустошены долины Дравы и Изеля, Дефереггенталь. Мощный поток из Фишбаха учинил разрушения в Ваттенсе. Сель из Гридлонтобеля обрушился на восточную часть селения Петнэй в Арльберге и перерезал шоссе.

1966 г. Мощные потоки бесчинствовали в долине Дравы и Лезахтале.

1967 и 1968 гг. Сели из Оксельбаха вновь атаковали Шлиттерс.

1969 г. в Пацнаунтале поток из Флатбаха забросал камнями и грязью на метровую высоту селение Вейлер Хабиген и на много дней прервал сообщение по шоссе, проходящему вдоль русел рек Тризаниа (приток Инна) и Иль (приток Рейна). Энтербах залил грязекаменной лавой западную часть Инцинга, здесь за 30 мин вылились осадки слоем 80 мм.

1974 г. Короткий мощный ливень (за первые 10 мин выпало 35 мм) над Циллерталем. Грязекаменные потоки из Оксельбаха и Ришбаха.

Маунт-Рейнир

Гляциальные сели широко распространены на тихоокеанском Северо-Западе Соединенных Штатов Америки. Здесь прорывные паводки, переходящие в грязекаменные потоки, отме-

чены на многих оледенелых вулканах цепи Каскадных гор, и в первую очередь на массиве Рейнир (4391 м). Для последнего восстановлена приближенная селевая хронология, основанная, как правило, на определении возраста деревьев, попавших в селевые отложения, радиоуглеродным методом.

Приблизительно 5 тыс. лет назад со склонов Рейнира сошли два потока, получивших условные названия Парадайс и Оцеола. Последний был грандиозен, объем его достигал 4 млрд. м³. Образовался он под ледниками Уинтроп и Эммонс и прошел двумя путями: по реке Уайт и ее левому притоку Вест-Фок, в устье которого оба потока соединились. Во время движения поток затопил грязью, смешанной с обломками породы, долину Уайт в километре ниже ледника Эммонс на глубину не менее 150 м. Он прошел 65 км вниз по долине и покрыл грязью приблизительно 170 км² в пределах низменности Пьюджет-Саунд, где сейчас находятся поселки Энамкло и Бакли.

Грязекаменный поток Парадайс двигался по долинам рек Парадайс и Нискуэлли, его объем составлял 300—400 млн. м³.

В период 1500 лет до н. э.—1500 г. н. э. селевые потоки неоднократно возникали во всех долинах массива Рейнир. Приблизительно 500 лет назад имел место большой грязевый поток, образовавшийся в бассейне реки Пьюаллап, прошедший 65 км и покрывший дно долины реки у Ортинга слоем грязи около 4,5 м. Триста лет назад крупный грязекаменный поток прошел в долине реки Нискуэлли.

14 октября 1932 г. поток высотой около 7,5 м и шириной около 45 м, двигаясь по руслу реки Нискуэлли, достиг моста. Удар снес весь центральный пролет длиной 17 м и шириной 8 м, с массивными поручнями, тротуаром и тяжелой декоративной аркой. Это мощное бетонное сооружение было перенесено приблизительно на километр вниз по течению. Группа посетителей национального парка Рейнир, согласно описанию сотрудника парка О. Томлинсона, „услышала грохот и увидела вал из воды, грязи и скальной породы, движущийся по направлению к ним“. Материал потока, по их рассказам, походил на бетонную смесь, но более темного цвета. Сила потока была столь велика, что „громадные валуны подбрасывались в воздух на 3—10 м“. Возникновению прорыва ледниковых вод способствовали обильные осадки.

Следующий прорывной паводок имел место на леднике Нискуэлли 24 октября 1934 г. после нескольких дней непрерывного дождя. При более значительных осадках паводок был менее разрушительным, чем предыдущий. В 1936 г. вместо уничтоженного был построен новый мост — массивное сооружение с бетонной аркой с пролетом 24 м и шириной 10 м.

24 октября 1955 г. после двух дней теплой и ясной погоды прошел дождь, повторившийся на следующий день. Ливневые воды пополнили запасы талых в резервуарах дренажной системы ледника Нискуэлли, в результате прорывной паводок сформировал мощный грязекаменный поток. По сведениям сотруд-

ника национального парка Д. Гамильтона, в течение 45 мин друг за другом прошло пять или шесть приблизительно одинаковых валов. Поражали размеры валунов и блоков льда, многие были больше автомобиля. „Они не катились или переворачивались, а подобно лодкам скользили по поверхности... Изредка огромные куски льда сталкивались с камнями и дробились, мелкие осколки выбрасывались высоко в воздух“. Скорость потока достигала 14—17 м/с.

В 1960 г. было закончено строительство нового моста длиной 92 м, поднятого над руслом реки на 26 м.

2 октября 1947 г. произошла катастрофа на реке Каутс-Крик, притоке Нискуэлли. Селевой поток возник вследствие аномально интенсивного ливня и прорыва ледниковых вод. До полутора километров ледника Кауц было разрушено, на его месте возник врез глубиной до 100 м и шириной 250—300 м. Объем вынесенного селем твердого материала оценивался в 38 млн. м³.

23 августа 1961 г. на Каутс-Крике наблюдался поток чисто ледникового происхождения. 31 августа 1967 г. прорвались внутрилетчерные водоемы на леднике Южная Тахома. Этот прорыв был превзойден 10 августа 1971 г.

Уаскаран, 1962, 1970

Уаскаран (6768 м) является высочайшей вершиной Кордильеры-Бланка — горной цепи в Перуанской Западной Кордильере, несущей наиболее значительное в этом районе оледенение.

В 18 ч 13 мин 10 января 1962 г. часть ледника северной вершины Уаскарана длиной почти до километра и толщиной более 30 м общим объемом 2—3 млн. м³ без каких-либо сейсмических воздействий с почти километровой высоты обрушилась на нижний ледник, захватив по пути множество обломков горной породы. В результате часть нижнего ледника площадью около 0,2 км² была разрушена и приняла участие в дальнейшем движении этой скально-водно-ледяной лавины. Общий объем последней исчислялся в 10 млн. м³. Ниже ледникового языка лавина мчалась на протяжении 3 км по 20-градусному склону со скоростью 30 м/с. Она представляла собой вал высотой 60—90 м и длиной до полкилометра. В районе крутого поворота долины налево, у древних морен ледника, где сейчас находятся озера Ллангануко, грязекаменный поток, мчавшийся со скоростью 25—30 м/с, имел поперечный уклон 20° и оставил отложения на террасе, лежащей на 150 м выше дна долины. Размер одной из наиболее крупных глыб, вынесенных сюда потоком, был 12×8×6 м. На последующем повороте долины вправо часть селевой массы отложила на левом берегу на высоте около 50 м. До этого места поток оставил V-образный врез.

Далее волна потока объемом уже около 13 млн. м³ прошла

через конус выноса с постепенно расширяющимся фронтом и уменьшающимися высотой и скоростью. В начале конуса передний вал высотой 15—18 м мчался со скоростью 4,5—9 м/с. По краям фронта высота вала составляла лишь 1,5—2 м. Однако в центре потока сила его воздействия была достаточной, чтобы нести глыбы размером $20 \times 15 \times 12$ м; длинные оси их оказались ориентированными параллельно биссектрисе конуса выноса. Когда грязекаменный поток достиг Рио-Санты, ширина его фронта составляла около полутора километров. Селевая масса была выброшена на противоположный берег реки на высоту 15 м. По ней в результате прорыва вздвинутой селевым потоком плотины прошла прорывная волна 12-метровой высоты.

Уаскаранский сель разрушил шесть селений полностью, в том числе крупный поселок Ранраирку, и три частично. Погибло 4 тысячи человек. Специалисты считали, что повторяемость такого потока около одного раза в столетие, а некоторые даже — в тысячелетие и реже. Тем не менее через 8 лет разразилась новая катастрофа.

31 мая 1970 г. в 15 ч 23 мин сильное землетрясение с эпицентром в 25 км к западу от перуанского портового города Чимботе за 45 с превратило в развалины города и деревни на площади около 65 тыс. км², в том числе города Уарос и Юнгай в долине Рио-Санты. В результате мощных сейсмических толчков с северной вершины Уаскарана от ледника Хелмес откололся громадный блок льда и горной породы. Общее количество вещества, принявшего участие в селевом процессе, слагалось из 7 млн. м³ скальной породы, 1 млн. м³ льда с вершины, 5 млн. м³ фирна с нижнего ледника, 30 млн. м³ моренных и прочих отложений, захваченных на трехкилометровом участке между высотами 4500 и 2800 м.

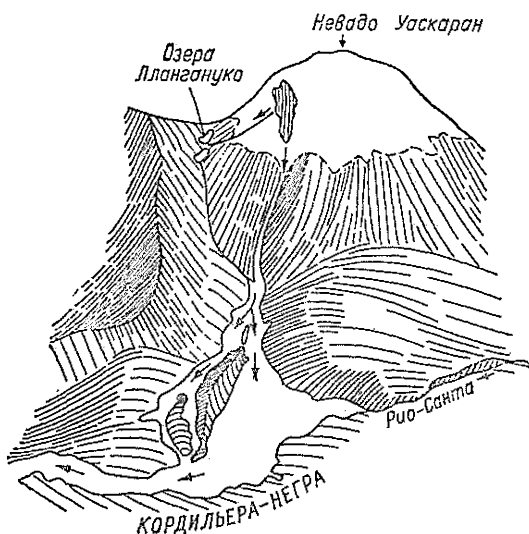
Рухнувшая масса льда и породы ринулась в долину по двум направлениям: на запад и на север.

Западный обвал объемом примерно 5 млн. м³ создал перемычку между верхним и нижним озерами Ллангануко.

Масса основного, северного, обвала, собственно и вызвавшего катастрофу, рухнула на нижний ледник и, нарастая, устремилась через морены, пастбища и поля вниз по долине реки Ллангануко. На первых 610 м потери высоты масса совершала почти свободное падение, следующие 2740 м — путь по уклону 23° и последние 670 м — по уклону 5°. Скорость движения фронта потока была исключительно велика, ее среднее значение на 14-километровом участке от подошвы Уаскарана (5700 м) до города Юнгай (2570 м) оценено приблизительно в 110 м/с (средний уклон 0,225). Валуны массой более 3 т выбрасывались из потока далее чем на 800 м.

Через какие-то 5 минут после начала землетрясения развалины города Юнгай были погребены под относительно небольшим языком грязекаменной массы (2,3 млн. м³). Мощность отложений здесь составила от 1,5 до 30 м над уровнем

городских построек. Поток, мчавшийся по долине Ллангануко, буквально перепрыгнул водораздел, имеющий здесь высоту 100—200 м, и обрушился на город, в то время как его предшественник 1962 г., шедший здесь со скоростью 25 м/с, не смог этого сделать. В долине Ллангануко был вновь почти полностью уничтожен поселок Ранраирка, заново отстроенный после катастрофы 1962 г. значительно южнее прежнего места.



Схематический рисунок склона горы уаскаран и долин Ллангануко и Рио-Санта, где образовался и двигался катастрофический селевой поток 1970 г. Черным кружком отмечено местоположение города Юнгай.

Большой интерес представляет описание этого уаскаранского селя геофизиком Матео Касаверде из Перуанского геофизического института, который случайно именно в это время повез чету французских туристов осматривать окрестности города Юнгай:

„...Землетрясение начало затихать. В это время я услышал сильный рев и грохот со стороны Уаскарана. Взглянув туда, я увидел что-то в виде тучи пыли; казалось, будто большая масса камня и льда откалывается от северного пика. Мне сразу же захотелось забраться повыше, и я побежал к вершине кладбищенского холма, который был в 150—200 м от нас. Я заметил, что многие в Юнгае тоже бегут к этому холму... Гребень приближающегося вала кончался чем-то вроде клуба пены, как у громадных океанских волн. По-моему, высота вала была не меньше 80 м. Было видно, как сотни людей в Юнгае бегут в

разные стороны, и многие из них к кладбищенскому холму. Все это время не прекращался страшный рев и грохот. Я добежал до верхней площадки холма в тот момент, когда поток каменных обломков ударился об основание этого холма... Это было самое ужасное, что я когда-либо пережил, и я никогда этого не забуду".

В долине Рио-Санта поток выбросил селевую массу на противоположный берег на 53 м и после поворота на 90° имел достаточно сил для опустошения долины по обоим берегам реки. Поток жидкой грязи с включением мелких гранодиоритовых валунов и гальки, прошедший вниз по руслу Рио-Санты, преодолел 50 км за 2 часа (скорость 7 м/с).

Погибло по меньшей мере 18 тысяч человек.

4. ЛИВНИ...



Рокуэлл Кент. Ливень.

...В сей день разверзлись все источники великой бездны, и окна небесные отворились; и лился на землю дождь...

Бытие

Лишь выдающиеся ливни способны вызвать особо крупные селевые потоки. Но какой ливень можно назвать выдающимся?

Каждый из нас, видимо, может припомнить один-два случая в своей жизни, когда ему пришлось быть свидетелем выпадения особо сильного дождя. Но вряд ли он сумеет описать его количественно.

Всякий дождь можно охарактеризовать его интенсивностью и продолжительностью. Какой же бывает интенсивность дождей? Уныло моросящие осадки, создающие всем знакомое элегическое осеннее настроение, имеют интенсивность около 0,01 мм/мин. Дождь, во время которого в течение минуты выпадает слой воды 0,1 мм, уже считается достаточно сильным, а ливень интенсивностью 1 мм/мин (это когда на площадку площадью 1 м² за минуту выливается 1 л воды) следует назвать выдающимся. Но что же тогда можно сказать о сверхливне, когда превышает цифра 10 мм/мин? Это уже своего рода ливневая катастрофа, падение небес на землю, конец света. Именно такой ливень мог вызвать в свое время всемирный

Продолжительность, мин	Слой осадков, мм	Средняя интенсивность, мм/мин	Пункт	Местоположение	Дата
1	31,2	31,2	Юнионвилл	США, Мэриленд	4 июля 1956
8	126	15,7	Фюссен	ФРГ, Бавария	25 мая 1920
15	356	23,7	Булавайо	Южная Родезия	—
15	198	13,2	Пламб-Пойнт	Ямайка	12 мая 1916
20	206	10,3	Куртеа-де-Аржес	Румыния	7 июля 1889
42	305	7,3	Холт	США, Миссури	22 июня 1947
120	650	5,4	Шауеринг	Австрия	10 августа 1915
180	670	3,7	Грац	Австрия	16 июля 1913
540	1087	2,0	Белюв	Реюньон	28 февраля 1964
1440	1870	1,3	Чилаос	Реюньон	15-16 марта 1952

потоп. Англичане и американцы имеют специальный термин для обозначения такого явления: cloudburst, что в буквальном переводе означает „облачный взрыв“. В авторитетном толковом словаре Уэбстера об этом термине сказано, что он соответствует внезапному обильному дождю, оставляющему впечатление, что все облако разом вылилось на землю. Приблизительно такой же перевод имеет немецкий термин Wolkenbruch (облачное обрушение). Уместно вспомнить и французское sacs d'eau (буквально — мешки с водой, надо полагать, прохудившиеся).

Гляциолог Н. Н. Пальгов, застигнутый в окрестностях Алма-Аты 8 июля 1921 г. ливнем, вызвавшим известную верненскую селевую катастрофу, так описывает свои впечатления: „В момент наибольшей интенсивности, продолжавшейся 3—4 мин, ливень представлял сплошной поток; ощущение от него было такое, какое появляется, когда окунешься с головой в воду; чтобы сделать вдох, приходилось для защиты носа прикладывать ладонь к козырьку фуражки, иначе не хватало воздуха и невозможно было дышать“.

Для образования значительных паводков и селевых потоков необходимо, чтобы высокая интенсивность дождя не снижалась достаточно долго.

Итак, интенсивность и продолжительность.

Действительно, желательны именно совместное использование этих показателей ливня, ибо для поддержания данной интенсивности в течение более длительного времени требуются и более значительные атмосферные усилия. Поэтому обычно между собой сравнивают интенсивность дождей за одни и те же отрезки времени, а для гидрологических расчетов часто используются зависимости максимально возможной средней интенсивности дождя, выпадающего в течение времени t :

$$i = \frac{S}{t^n} \text{ или } i = I \left(\frac{T}{t} \right)^{1-n} = \frac{H}{t^{1-n} T^n}, \quad t \leq T, \quad n < 1,$$

здесь S — максимальная минутная интенсивность, H , T и I —

слой, продолжительность и средняя интенсивность дождя. Первое выражение — однопараметрическое, второе — двухпараметрическое и тем самым более отвечающее реальности ситуации.

Представление о предельных возможностях земной атмосферы по генерированию ливней дает таблица, где собраны ливни-рекордсмены, наблюдавшиеся на земном шаре.

5. ...И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ

Видишь, горных хребтов затянулись верхи,
Дождь сегодня к иссохшей спустился долине.
Мы пасем этот дождь, мы его пастухи,
Мы примерные спутники ливням отныне.

Симон Чиковани. Дождь идет
(пер. Николая Заболоцкого)

Ливни проливаются над горами... Каковы ливни, таковы и паводки. Ну, а если точнее?

Гидролог может считать себя понимающим природу процесса формирования паводков только в том случае, если он способен уверенно рассчитать их гидрограммы по плювограммам. Для этого необходимо обладать приемлемой моделью процесса, учитывающей основные закономерности и удовлетворительно согласующейся с действительностью. Прошу читателя не пугаться, я не буду здесь нагромождать формулы и алгоритмы, а при описании некоторых процессов приведу лишь простейшие уравнения с чисто иллюстрационной целью. Здесь они везде алгебраические, но существуют методы расчета, использующие и сложные дифференциальные уравнения, аналитически неразрешимые и требующие вмешательства ЭВМ. Имеет место даже нездоровое соревнование сделать такие уравнения посложней, и в этом случае трудно заметить, когда математические построения отрываются от гидрологии.

Поверхностным путем стекают дождевые воды, не успевающие при выпадении ливня проникнуть в грунтовую толщу. Соотношение впитавшейся и стекающей воды определяется кроме характера дождя в основном инфильтрационной способностью почв и грунтов на поверхности водосбора. В начале дождя сухая почва жадно впитывает влагу, сток отсутствует. В этой стадии происходит насыщение поверхностного слоя почвы. Количество поглощенной воды в основном зависит от его предшествующего увлажнения. После выпадения слоя осадков, численно равного слою начальных потерь H_0 , начинается вторая стадия процесса инфильтрации, когда инфильтрационную

способность можно считать постоянной и равной f_0 , а интенсивность впитывания f зависящей только от интенсивности дождя, $f = f_0 [1 - \exp(-i/f_0)]$. (*)

Здесь i — интенсивность ливня, а обозначение $\exp(-x)$ соответствует показательной функции e^{-x} , где e — основание натуральных логарифмов.

Выделение двух стадий инфильтрации, между которыми проведена столь резкая граница, является достаточно правильной схематизацией. При очень сильном ливне, когда интенсивность дождя во много раз превышает инфильтрационные возможности, приведенное уравнение предельно упрощается и $f = f_0$. Интенсивность стокообразования q представляет собой простую разность интенсивностей дождя и инфильтрации $q = i - f$. Если мы хотим рассчитать среднюю интенсивность стокообразования за время выпадения всего дождя, зная при этом лишь его среднюю интенсивность I , то ни в коем случае нельзя воспользоваться соотношением (*), подставив I вместо i , а следует употребить формулу $\bar{q} = I^2 / (I + f_0)$.

Дождевые воды, просачивающиеся сквозь толщу рыхлообломочной породы и рано или поздно достигающие русла, относят к различным категориям грунтового стока. Пути и время миграции таких вод зависят от геологической структуры верхних слоев горной породы в бассейне и могут быть самыми различными. Обычно существует целый лабиринт подземных каналов стока, приуроченных к водоупорной поверхности.

Если время от начала выпадения осадков на поверхность водосбора до момента выклинивания дождевой воды в русло не настолько велико, чтобы отдельная паводковая волна потеряла свою индивидуальность, мы говорим о быстром грунтовом стоке. Он всегда значительно более зарегулирован, чем поверхностный, и определение „быстрый“ призвано лишь оттенить его отличие от подлинно подземного стока. Таким образом, быстрый грунтовый сток занимает подходящее ему место между поверхностным и подземным видами стока. Очевидно, что резкая граница между всеми тремя видами стока отсутствует.

Слой начальных потерь — это слой осадков, выпавших до начала стокообразования. Для быстрого грунтового стока он может быть определен и как количество воды, необходимое для доведения влажности толщи почвы или рыхлой горной породы над водоупором до уровня, который называют наименьшей влагемкостью, т. е. до состояния, когда порода уже не может удерживать ни капли лишней воды, и если таковая поступит, то стечет полностью, без остатка. Во всех случаях слой начальных потерь стока следует интерпретировать таким образом, чтобы, помимо почвенно-грунтовой аккумуляции, сюда же отнести и задержание воды растительным покровом.

Оба варианта паводкового стока, поверхностный и быстрый грунтовый, широко распространены в горах и, как прави-

ло, в пределах каждого бассейна, а зачастую и склона, совместно принимают участие в питании русловой сети.

Поверхностный сток чаще всего имеет место на скалистых участках, на склонах с глинистыми и суглинистыми почвами, в значительной мере смытыми и лишенными сплошного растительного покрова, на альпийских лугах. Во всех случаях интенсивный поверхностный сток оставляет признаки своей эрозивной работы. Существует тесная связь между возможностями образования стока и быстрого беспрепятственного его сбрасывания в русловую сеть.

Быстрый грунтовый паводковый сток возникает во время длительных дождей и ливней на водосборах самого различного характера. Разрушающиеся скалы со шлейфами обломочных отложений, курумы, осыпи, склоны гор, поросшие густой травой, лесом и кустарником, — вот тот широкий круг горных ландшафтов, который связан с формированием этого вида стока.

Суммарное балансовое соотношение осадков и стока для отдельного паводка очевидно: $H = H_0 + H_f + H_q$, т. е. слой осадков распределяется между слоями начальных потерь, инфильтрации и стока (стокообразования).

Однако важно знать не только общее количество воды, выпавшей в виде дождя и покинувшей пределы бассейна в виде руслового стока, но и взаимное соотношение интенсивностей процессов стока и стокообразования во времени. Основной обобщенной временной характеристикой каждого паводка, сформированного в пределах данного бассейна, может служить так называемое время добегания или концентрации стока Θ . Определяется оно как временной отрезок между двумя моментами, до и после которых слои или объемы стока на гидрограммах стокообразования и стока в замыкающем створе одинаковы.

Здесь следует остановиться на определении „гидрограмма“. Почему-то обстоятельства сложились так, что график хода во времени интенсивности дождя называют плювиограммой, а подобный же график, но для расхода воды в реке — не гидрограммой, что было бы естественно, а гидрографом. Ситуация вконец запутанная, особенно если учесть, что „плювиограф“ — это прибор, предназначенный для регистрации осадков, что для расходомера-самописца его естественное наименование похищено и что гидрографом называют и специалиста, занимающегося гидрографией. При такой чрезмерной нагрузке на термин „гидрограф“, пожалуй, следует оставить его для человека и прибора, а для графика перейти на „гидрограмму“.

Приведем в порядок все то, что было сказано, рассмотрев генетическую последовательность элементарных процессов, на которые можно разбить общий процесс формирования паводка. Такая последовательность представлена в таблице, где помещены также обозначения и некоторая другая полезная информация. Все перечисленные процессы можно измерять в одних и тех же единицах, однако традиционно, и это удобно, харак-

Процесс	Обозначение				Операция	Графическое представление
	интегральное		дифференциальное			
	слой, мм	объем, м ³	интенсивность, мм/мин	расход, м ³ /с		
Выпадение дождя	H	—	i	—	—	Плювиограмма
Перехват растительностью и начальное насыщение почвы	H_0	—	—	—	$H - H_0$	Усеченная плювиограмма
Инфильтрация	H_f	—	f	—	Уравнение	Инфильтрограмма
Стокообразование	H_q	—	q	Q_q	$q = i - f$	Гидрограмма стокообразования
Приток в русловую сеть	—	—	—	Q_r	1-я трансформация	Гидрограмма притока в русловую сеть
Русловой сток	—	W	—	Q	2-я трансформация	Гидрограмма стока в замыкающем створе

теристики дождя, инфильтрации и стокообразования измеряют в миллиметрах и в миллиметрах в минуту, а приток в русловую сеть и русловой сток в кубических метрах и кубических метрах в секунду. Переход от одних единиц к другим осуществляется с учетом величины площади бассейна F с помощью простейших соотношений $1 \text{ мм} \rightarrow 1000 F \text{ м}^3$, $1 \text{ мм/мин} \rightarrow 16,67 F \text{ м}^3/\text{с}$, где F измеряется в квадратных километрах.

Интенсивность дождя, инфильтрации и стокообразования в каждый момент времени связаны друг с другом четкой зависимостью типа уравнения (*). Иначе дело обстоит в случае последовательной трансформации стокообразования в приток к русловой сети и сток в замыкающем створе. При этой трансформации все три гидрограммы сохраняют одинаковую площадь под кривыми, но очертания последних закономерно изменяются. Приведу относительно простые уравнения, выполняющие эти две операции трансформации:

$$Q_r \{t\} = \frac{Q_q + b}{1 + \frac{Q_q - Q_0}{b + Q_0} \exp[-a(t - t_0)(Q_q + b)]} - b,$$

$$Q \{t\} = \int_0^{\tau_m} Q_r \{t - \tau\} F'(\tau) d\tau, \quad \int_0^{\tau_m} F'(\tau) d\tau = 1,$$

Здесь Q_0 — начальное значение Q_r в момент времени t_0 ; Q_q — среднее значение интенсивности (расхода) стокообразо-

вания в течение времени $t-t_0$; a и b — параметры водосбора, связанные с его площадью, уклоном и условиями стекания; τ — время руслового добега; τ_m — его максимальное значение для данного бассейна; $F'(\tau)$ — относительная функция распределения площади водосбора по времени руслового добега; в фигурных скобках время стоит в качестве аргумента.

Если $F'(\tau)=1/\tau_m$, т. е. равномерна (прямоугольный бассейн), то последняя трансформация сводится к операции скользящего осреднения по времени τ_m .

Упомянутое выше время концентрации Θ связано с временем руслового добега τ соотношением $\Theta=\tau+\tau_{ab}$, где τ_{ab} — время добега к русловой сети (время склонового добега), которое определяется величинами коэффициентов a и b , причем, чем a и b больше, тем меньше время τ_{ab} . При очень больших величинах τ_{ab} , когда $\tau_{ab} \gg \tau$, дополнительная трансформация в соответствии со вторым уравнением теряет смысл.

Подводя итоги сказанному, мы видим, что для решения гидрологических задач по расчету паводков необходима целая серия показателей (в наших примерах это a , b , f_0 , τ), определить которые можно по материалам наблюдений в природе за прохождением паводков на разных водотоках и в разной ситуации. Особую ценность при этом приобретают наблюдения на микроводосборах (0,01—1,0 км² для быстрого грунтового и 0,001—0,01 км² для поверхностного стока), так как в этом случае все параметры можно приписать одному определенному типу поверхности, более или менее однородному в геологическом, геоботаническом, почвенном и прочих отношениях. Кроме этого, на микроводосборе осадки, сток и влажность почвы, т. е. элементы, наблюдения за которыми обязательны для получения полноценных выводов, можно измерить с большой точностью.

Обычно подобные исследования проводят на специализированных стоковых или воднобалансовых станциях. Однако таких станций немного, а в горах их и того меньше. Поэтому особо следует подчеркнуть возможность и важность временных наблюдений, в течение одного-двух сезонов. Несмотря на отрывочность, они позволяют произвести хотя бы приближенную оценку необходимых расчетных параметров и выявить основные гидрологические особенности данного типа стокообразующей поверхности. Систематические наблюдения за формированием дождевого стока и паводков на микроводосборах, разнообразных по характеру и расположенных в разных географических районах, позволяют в значительной мере обеспечить теорию и практику расчетов ливневого стока необходимыми экспериментальными данными.

Названные работы обычно ведутся в труднейших экспедиционных условиях, и не к любому месту в горах можно податься на вертолете. Более того, во время гроз и дождей, когда другие экспедиции отсиживаются в палатках, работа гидрологов, посвятивших себя исследованиям формирования

ливневого стока, наоборот, входит в кульминационную фазу. Автор и его товарищи, сначала по Институту водных проблем и гидротехники Академии наук Узбекистана, а затем по Казахскому научно-исследовательскому гидрометеорологическому институту, в течение многих лет изучали формирование дождевых паводков. За эти годы многое было сделано на исхлестанных дождями склонах среднеазиатских (Чаткальский, Угамский, Илякский, Каратепе, Терской Алатау, Заилийский Алатау) и сибирских (Хамар-Дабан, Северо-Муйский, Кодар, Удокан) хребтов.

Ливни проливаются над горами... Сначала поникают травы и склоняются к земле отяжелевшие от намокшей листвы и хвои ветки деревьев, затем отовсюду начинает сочиться влага, и скоро кажется, что на свете нет ничего, кроме мокрых склонов, разорванных ливневых облаков и падающей с неба воды. Со скал свисают струи водопадов, отовсюду несутся мутные вспененные ручьи, грохот водных потоков и сталкивающихся валунов, сливаясь с шумом дождя, создает неподражаемое звучание, время от времени прерываемое раскатами грома. Именно в это короткое время горы живут своей настоящей жизнью. Обычно все это редко кто видит: трудно противиться привычному побуждению укрыться под крышей.

Но кто не бывал в грозу в горах, кто не ощущал этого бурного торжества сил природы, этого великоления, — пусть обязательно попробует.

6. ОБРЕЧЕННОСТЬ ЛЕДЯНЫХ ПЛОТИН

Пускай плотины не дают бежать потокам,
Те все равно сметут помехи на пути!

Отомо Саканоз (VIII в.)

Одной из самых крупных ледниково-селевых катастроф является прорыв временно подпруженных ледниками озера. Завальные озера, возникшие в результате обвалов и оползней горной породы, могут существовать десятки, сотни и тысячи лет, хотя и они могут прорваться. Ледяные же плотины, сколь бы мощными они не были, недолговечны. Лед тает, трескается, отдельные его блоки всплывают, и разрушение такой плотины — вопрос времени.

Известной и почти безотказно действующей накопительно-прорывной гляциальной системой служит озеро Мерцбахера в Центральном Тяньшане, лежащее на высоте около 3000 м между концом ледника Северный Иныльчек и бортом ледника

Южный Иныльчек на расстоянии 14—15 км от оконечности последнего. К концу лета озеро собирает до 165 млн. м³ воды, а его площадь составляет около 4 км². Характерно большое скопление айсбергов, которые достигают здесь 50—60-метровой высоты.

Ежегодно с конца июля до середины октября, а чаще всего в августе-сентябре озеро Мерцбахера прорывается, вызывая на реках Иныльчек и Сарыджаз мощные паводки, длящиеся несколько дней. Объемы прорывных паводков в 1963, 1964 и 1965 гг. были равны 220, 140 и 120 млн. м³, максимальные расходы обычно составляют 1000—2000 м³/с.

Дренаживание озера происходит по внутриледной туннельной системе, имеющей более или менее постоянные выходы в 200—300 м выше оконечности ледникового языка.

В прошлом катастрофические прорывные паводки наблюдались при прорыве озер, подпруживаемых ледником Федченко в устьевых частях долины Баяндикника и Малого Танымаса (Бадахшан-Памир). Еще в 1914 г. проход из долины Баяндикника в долину Сельдары был сильно стеснен ледником. В настоящее время в связи с сокращением оледенения в нижних частях боковых притоков ледника Федченко существуют несколько периодически прорывающихся озер, самое крупное из которых расположено у выхода из долины ледника № 5 (600×1000 м). Это озеро прорывалось 28 сентября 1957 г. и 8 июля 1958 г. Аналогичные прорывы свойственны озеру, подпруженному в нижней части долины ледника Бивачного.

Около 1910 г. в результате быстрого продвижения ледника Русского географического общества (хребет Академии наук, Бадахшан-Памир) в долине реки Абдукагор образовалось озеро длиной 3 км и объемом около 70 млн. м³. Прорыв ледяной дамбы вызвал катастрофический паводок в долине реки Ванч. В дальнейшем на смену леднику Географического общества пришел ледник Медвежий, который во время своих интенсивных подвижек перекрывал долину реки Абдукагор и создавал временную ледяную запруду. В 1963 г. дважды (19 июня и 3 июля) имели место ледниковые паводки. В начале лета 1973 г. после мощной подвижки Медвежьего озера образовалась вновь. К моменту прорыва в озере скопилось 15 млн. м³ воды, максимальная глубина достигала 106 м. Ледяная плотина возвышалась над дном озера на 115—170 м. Самая нижняя часть ее возвышалась над уровнем озера менее чем на 10 м.

Прорыв озера начался около 8 ч утра 19 июня. Против ожидания, вход в туннель, через который озеро опорожнялось, оказался расположенным не на максимальной глубине, а на 57 м выше. В результате была сработана лишь 49-метровая толща воды объемом 12 млн. м³. Максимальный расход прорывного паводка оказался близким к 1000 м³/с.

Вследствие движения ледника туннель после прорыва закрылся, и озерная котловина вновь наполнилась водой. 3 июля, когда объем воды в озере составлял 14 млн. м³, произошел

второй прорыв, после которого в озере осталось 2 млн. м³ воды. Максимальный расход составил 1500 м³/с. Возле поселка Ванч (90 км от ледяной плотины) высота прорывной волны достигла 6 м.

На северном склоне Большого Кавказа широко известна серия так называемых казбекских завалов, в свое время неоднократно выводивших из строя Военно-Грузинскую дорогу. Думаю, что именно памяти горцев мы обязаны появлением следующих строк Н. Заболоцкого, посвященных Казбеку:

А он, в отдаленье от пашен,
В надмирной своей вышине,
Был только бессмысленно страшен
И людям опасен вдвойне.

Девдоракский ледник, расположенный на северо-восточном склоне горы Казбек (5047 м), в верховьях реки Кабахи (или Амали) в результате обвальных подвижек подпруживал озеро, которое, прорываясь, формировало мощные грязекаменные потоки. Выпусы последних неоднократно создавали на Тереке „завалы“. В 1776 г. Терек был прегражден в течение трех дней, в 1808 г.— 2 ч, в 1817 г.— почти сутки, в 1832 г.— 8 ч. Весьма серьезные катастрофы произошли 18 июня 1776 г. и 13 августа 1832 г. (по старому стилю). В 1776 г. прорыв временного озера на Тереке, образованного „завалом“, затопил селение Гвилети. Объем выносов селевого потока 1832 г. оценивается в 15,5 млн. м³.

Член немецко-австрийского Альпийского общества геолог и селевик Ф. Фрех рассказывал, что в 1897 г. он видел с Военно-Грузинской дороги отрезок пути (специально маркированный белым цветом для участников 7-го Международного геологического конгресса) на высоте 90 м, ранее обходившего озеро, подпруженное таким завалом.

А. С. Пушкину принадлежат слова („Путешествие в Арзрум во время похода 1829 года“): „Терек прорылся сквозь обвал не прежде, как через два часа. То-то был он ужасен!“

В Альпах документальная история природных катастроф более богата. Ледник Аллалин в Пеннинских Альпах, известный обвалом 30 августа 1965 г., в течение XVII—XVIII вв. периодически наступал, подпруживая Заасталь и образуя озеро Маттмарк, прорывы которого вызывали опустошительные паводки на реке Засер-Висп. С 1589 по 1808 г. имел место 21 прорыв. Самые сильные паводки случились 4 августа 1633 г., 17 сентября 1772 г. и 27 августа 1834 г. С 1859 г. озеро прорывалось 26 раз. В 1834 г. объем озера достигал 19 млн. м³, в 1866 — 6, в 1916 — 0,2 и в 1920 — 0,5 млн. м³.

Ледник Рюптор (Грайские Альпы, долина Тюнль, примыкающая к долине Аоста), наступая, образовывал озеро того же названия (или Осселеттес), известное своими наводнениями. Объем озера достигал 3—4 млн. м³. Имел место случай истече-

ния 4,5 млн. м³ за 6 ч. С конца XVI в. до 1752 г. произошло не менее 50 прорывов, которые случались ежегодно между 1594 и 1606, 1678 и 1681, 1748 и 1751 гг. С 1864 г. прорывной комплекс ледник — озеро Рюнтор перестал существовать.

Ледник Фернагт (Эцтальские Альпы) во время периодических наступлений возводил в долине Рофенталь иногда 100-метровую ледяную плотину, создающую озеро Айсзее или Рофен глубиной 50—70 м. Объем озера в 1845 г. составил 8 млн. м³, а объем паводков в 1678 и 1847 гг. 10 млн. м³. В жизни ледника Фернагт было четыре активных периода: 1600—1601, 1678—1683, 1771—1774 и 1845—1848 гг., когда образовалось пять особо крупных паводков (20 июля 1600 г., 16 июля 1678 г., 14 июня 1845 г., 28 мая 1847 г. и 13 июня 1848 г.).

Ледник Жнетро (Пеннинские Альпы), обрушившийся в Валь-де-Бань, создал озеро объемом 15—20 млн. м³. В июне 1818 г. после нескольких частичных прорывов озеро опустошилось в течение получаса. Перед прорывом его длина была 2,5 км, глубина достигала 45 м. Улицы города Мартиньи-Виль, расположенного недалеко от впадения реки Дранс в Рону, были затоплены 3-метровым слоем воды. Раньше катастрофы здесь имели место в 1595 и 1640 гг. В 1971 г. местные газеты писали о новом предстоящем обвале ледника Жнетро, но слухи оказались необоснованными.

Озеро Мэрьелен (Бернские Альпы), подпруживаемое Большим Аалечским ледником, в течение 1813—1900 гг. прорывалось 19 раз, производя большие разрушения в ущелье реки Масса. В 1873 г. из озера за 8 ч вытекло около 10 млн. м³ воды, в 1878 г. за 9 ч — 7,8, а за 30 ч — 10,7. В XX в. озеро прорывалось в 1939 и 1947 гг. В 1889 г. был пробит туннель длиной 548 м, чтобы отводить воду в соседнюю долину Зеебах, однако отступление Большого Аалечского ледника сделало его ненужным. В июле 1965 г. было обнаружено, что озеро Мэрьелен исчезло.

Широко известны случаи прорывов ледниковых озер в Норвегии, где их изучению уделяют большое внимание.

Ледник Тунсбергдальсбре (ледниковый массив Юстедальсбре) подпруживал озеро Бримкьелен в устье одноименной долины. С 1896 по 1900 г. и в 1903 г. прорывы озера вызвали паводки на реке Лейрдал. В 1926 г. из озера вытекло 25—30 млн. м³ воды; при этом гравий и валуны были смещены на 14 км от конца ледника Тунсбергдальсбре в Юстедальс-Эльв. Последний прорыв озера Бримкьелен относится к 1962 г., после чего оно исчезло.

Озеро Деммеватн подпруживалось ледником Рембесдальскаак (ледниковый массив Хардангерфьелен) и вызывало паводки на реке Симодал, длившиеся 2—3 недели. Такие паводки имели место в 1891, 1892 и 1893 гг. 10 августа 1937 г. озеро опустошилось за 3,5 ч. Во льду дважды (1899 и 1938 гг.) пробивались туннели. После 1938 г. наводнения прекратились.

В Исландии прорывные ледниковые паводки, иногда дости-

гающие грандиозных размеров, очень часты. Именно здесь возник термин „jökulhlaur“, получивший распространение в специальной литературе и за пределами страны. Основные объекты на острове связаны с крупнейшим ледником Европы Ватнайёкудль (площадь более 8000 км²). Его край, обращенный к атлантическому побережью, распадается на множество языков, к которым и приурочены прорывающиеся озера.

Озеро Ватнсдалур подпруживается северной ветвью ледника Хейнабергсйёкудль. В 1860—1880 гг. котловина Ватнсдалур была заполнена водой, которая через седловину стекала в долину Хейнабергсдалур. Последняя была в свою очередь перекрыта языком того же ледника, в результате чего образовалось озеро Далвати, которое прорывалось почти ежегодно, опорожняясь в течение одного дня. Максимум продвижения ледника относится к 1880 г., в это время паводки были самыми мощными. С 1887 г. ледник стал заметно сокращаться, озеро Далвати постепенно уменьшалось и к 1920 г. окончательно исчезло. В конце ноября 1898 г. неожиданно прорвалось озеро Ватнсдалур, причем весь паводок длился немногим больше суток. С этого года озеро опорожнялось ежегодно, но паводки были более затяжными (до 10 дней) и менее мощными (максимум истечения наступал на 6—8-й день).

Озеро Далвати в период наибольшего развития (около 1880 г.) имело глубину 45 м, площадь 0,8 км² и объем 20 млн. м³, а озеро Ватнсдалур в 1898 г. имело максимальную глубину перед плотиной 110 м, площадь 1,9 км², объем 120 млн. м³ и максимальный расход истечения около 3000 м³/с.

Самые крупные и интересные объекты связаны с одним из крупнейших ответвлений ледника Ватнайёкудль — Скейдараурйёкудль. Последний во второй половине XVIII в., продвинувшись на юг, достиг своим юго-западным краем возвышенности Ломагнупур и образовал озеро Нупслон. Площадь его не превышала 5 км², средняя глубина достигала приблизительно 20 м и объем 100 млн. м³.

В верховьях реки Нупсвётн расположено озеро Грайналоун, воды которого по достижении отметки 635 м питают эту реку. Более низко расположенный выход из озера заблокирован льдами Скейдараурйёкудля. Самый древний из известных прорывных паводков, прошедший в середине августа 1201 г., связан с прорывом озера Грайналоун. Известен также паводок, имевший место в конце ноября 1898 г. С этого года и вплоть до 1935 г. озеро не прорывалось. Паводок в сентябре 1935 г. был неожиданным, прорыв повторился в конце июля 1939 г. В настоящее время прорывы озера случаются в два раза чаще. Максимальные расходы ранних паводков достигали 5—6 тыс. м³/с. Площадь озера Грайналоун 18 км², глубина более 150 м, объем приблизительно 1,5 км³.

На ледяном поле Ватнайёкудль расположено периодически опорожняющееся озеро Гримсвётн. Максимальная площадь озера 35—40 км², площадь водосбора 305 км². Накопленне во-

ды в озере происходит в основном вследствие подледникового таяния за счет вулканического тепла.

Прорывные паводки до 1938 г. проходили через 9—12 лет. Средний объем воды, выбрасываемый из Гримсвётна при прорыве, оценивался приблизительно в 7 км^3 . В 40-е годы вместо одного паводка нормальных размеров прошли три, значительно меньшие по объему: в сентябре 1945 г. (около 3 км^3), в феврале 1948 г. (около 2 км^3) и в мае 1949 г. (также около 2 км^3). В настоящее время интервал между последовательными прорывами сократился до 4—6,5 лет. Если максимальные паводковые расходы раньше составляли примерно 40 тыс. $\text{м}^3/\text{с}$, то теперь они снизились до 10,5 тыс. $\text{м}^3/\text{с}$. Последние прорывы имели место в июле 1954 г., январе 1960 г., сентябре 1965 г. и марте 1971 г. Во время прорыва прибрежная равнина Скейдараурсандюр затопливается паводковыми водами на площади до 1000 км^2 , при этом выносятся айсберги размером с трехэтажный дом. Паводок 1938 г. выбросил 150 млн. т наносов. Сейчас 32-километровый участок в пределах Скейдараурсандюра в связи с этим представляет собой единственный разрыв в кольцевой дороге острова.

Прорывающиеся ледниковые озера обратили на себя внимание и в приполярных районах: Гренландии, Канадском архипелаге и Советской Арктике.

Горы тихоокеанского побережья Северной Америки также богаты крупными и интересными объектами описываемого типа. В этом районе их сосредоточено не менее 60. В настоящее время по крайней мере 6 озер угрожают транспортным средствам на Аляске: озеро Джордж — железной дороге и шоссе на участке Анкоридж — Палмер; озера Ледяное, Нижнее Сколан и Бланш — шоссе и Северо-Западной железной дороге в бассейне реки Читина; озеро Тальсеква — путям в районе залива Таку; озера Флад и Грейт — навигации на реке Стикки.

Наиболее известными являются озера Джордж и Тальсеква.

Озеро Джордж (горы Чугач), образованное ледяной плотной ледника Ник, периодически прорывается, вызывая грандиозные паводки в юго-восточной части долины Матануска южнее города Палмера. Озеро возникает в долине, простирающейся от ледника на юго-запад. Заполненное водой озеро имеет ширину 3—6 км, длину 18—19, иногда достигая максимума — 22 км. Озеро прорывается обычно в июле—августе, преодолевая почти 11-километровый путь под ледником, и осушается за неделю. Это захватывающее явление снято в фильме У. Диснея „Белая пустыня“.

Первые сведения о разрушительных прорывах озера Джордж относятся к 1899—1900 гг. Начиная с 1918 г. озеро опорожнялось ежегодно. Максимальный расход прорывного паводка в 1958 г. оценен в 10 тыс. $\text{м}^3/\text{с}$.

Озеро Тальсеква (Береговой хребет, граница Канадской провинции Британская Колумбия и Аляски) подпружено одно-

именным ледником, входящим в систему ледникового поля Джуно. Прорывные паводки случались здесь периодически по крайней мере с 1910 г., а с 1942 до 1958 г. они проходили ежегодно. За годы слежения за поведением этого озера наметилась четкая тенденция уменьшения максимального объема:

Годы	1910—1920	1926	1942	1950	1958
Максимальный объем, млн. м ³ .	907	613	380	294	229

Озеро прорывается обычно в июле—сентябре, хотя известно и исключение — в 1926 г. это случилось в январе. Опорожнение водоема происходит через подледный или внутриледный туннель, который в 1958 г. имел 7-километровую длину. Максимальный расход прорывного паводка в этом же году составил 1560 м³/с.

Анды Южной Америки также богаты прерывающимися ледниковыми озерами.

В самом конце 1933 г. на фоне общего отступления ледников у подножия массива Невадо-дель-Пломо (6060 м) в 50 км к югу от высочайшей вершины Америки Аконкагуа (6960 м) произошло стремительное продвижение ледника Невадо, преградившего течение реки Рио-Пломо. Образовавшееся озеро глубиной около 30 м было осушено 10—11 января 1934 г. По Рио-Пломо и далее по реке Мендоса прошел выдающийся паводок, максимальный расход его по некоторым оценкам составил 3000 м³/с. Мощный водный поток буквально очистил дно долины от рыхлообломочной породы и разрушил 7 мостов и 13 км трансандийской железной дороги, проходящей по ущелью Мендоса и через туннель Кумбре из Аргентины в Чили. Дорогу удалось восстановить лишь через 10 лет.

Грандиозные прорывные паводки отмечены в крупнейшем горном ледниковом районе мира — Каракоруме. Здесь за последние 150 лет имели место не менее 50 случаев прорывов ледниковых озер.

В верховьях реки Шайок — крупного правого притока Инда из боковых долин в главную спускаются ледники Чонг-Камдан, Кичик-Камдан и Акташ, время от времени перегораживавшие течение реки и образывавшие озеро Гапшан. Первый из известных паводков датируется приблизительно 1780 г. Со слов яркендских торговцев был описан паводок, случившийся в июне 1835 г. Виновником катастрофы предположительно назван ледник Чонг-Камдан. Высота ледяной плотины была оценена в 200 м. 15-метровая паводковая волна пронеслась ночью мимо селения Шайок, расположенного в 160 км от озера на высоком (60—90 м) берегу. Расстояние от плотины до устья реки Нубры (240 км) было пройдено с рассвета до полудня. Здесь сильно пострадали селения Лиакзун и Дескит.

Следующие паводки прошли в 1839 и 1842 гг. Вот описание состояния ледника Кичик-Камдан, данное в 1873 г.: „Конец ледника простирается вниз по правому берегу реки на 2 мили (3,2 км), образуя прямо-таки стену из льда, поднимающуюся из воды на 120 футов (40 м) и имеющую поверхность с бесчисленными остроконечными глыбами и шпильями. Отдельные его части неподвижно высились в некоторых местах на противоположном берегу, где его масса упиралась в круто поднимающиеся красные утесы и преграждала реку, образуя озеро, которое в конце концов прорвется в результате повышения давления накопленных вод“. Начиная с этого момента и до 1889 г. сведения о поведении ледников верхнего Шайока отсутствуют, хотя, судя по всему, они продолжали действовать в излюбленной манере: в августе 1879 г. и июле 1882 г. промчавшиеся по Инду паводковые волны обеспечили приращение уровня у Аттока (1200 км ниже озера) на 9 и 10 м.

В 1899 г. было начато строительство дороги вверх по долине за ледник Акташ, приостановленное в связи с возобновившимся продвижением ледника Кичик-Камдан. Шведский географ и путешественник Свен Гедин в апреле 1902 г. был последним, кто успел пройти по 10-метровому проходу между скалами и концом ледника. Действительно, 1903 г. был отмечен прорывом ледяной плотины Кичик-Камдан.

В октябре 1926 г. прорвалась ледяная дамба ледника Чонг-Камдан. Паводок снес подвесной мост у места слияния Шайока и Нубры (240 км от озера) и распространился вверх по течению последней на 13—16 км. При 900-метровой ширине Шайока у устья Нубры уровень поднялся более чем на 9 м выше обычного, а в ущелье между Унмару и Бьягданго (39—58 км ниже устья Нубры) подъем оказался равным 21 м. Полностью или частично были разрушены селения Лиакзун, Дескит и Абадан.

Летом 1928 г. озеро Гапшан достигало уже больших размеров. Свидетель, посетивший озеро в 1929 г. незадолго до прорыва, писал: «Все время, пока мы были внизу у плотины 12 августа, слышались громкие скрипы и „стоны“, возникающие, когда ледяные поля откалывались от основного тела». Плотина была прорвана утром 15 августа. К этому времени объем озера достиг 3,8 км³, а максимальная глубина 125 м. Вниз по реке Шайок со скоростью 6 м/с ринулась грандиозная прорывная волна высотой до 26 м. Паводок достиг Кхалсара (230 км от плотины) в 8 утра 16 августа, Скардо (560 км) — в 20 ч 30 мин и Аттока (1200 км) около 2 ч 15 мин 18 августа. У последнего расход возрос от 9450 до 19 200 м³/с. О величине паводка свидетельствовали разбросанные вдоль русла реки Шайок ледяные глыбы размером до 15—20 м.

10 июля 1932 г. вновь прорвалась дамба ледника Чонг-Камдан.

Кратерное озеро вулкана Руапеху (2797 м) на Северном острове Новой Зеландии, подпруженное ледовой перемычкой,

24 декабря 1953 г. излилось через трещину, которая быстро увеличилась до размеров мощного прорана 45-метровой ширины и 30-метровой высоты. За 150 минут освободилось 340 тыс. м³ воды. Грязекаменный поток с передовым валом, имеющим высоту 6 м и расход 850 м³/с, устремился вниз по долине реки Уонгаэху. Промчавшись 24 км, он разрушил центральную опору железнодорожного моста, в результате чего экспресс Веллингтон-Окленд, проходивший в этот момент через мост, рухнул вместе с ним в селевой поток. 125-тонная мостовая опора была отброшена на 64 м, а один из вагонов проплыл в потоке 2,4 км. Более 150 пассажиров погибли.

Механизм опорожнения озер, подпруженных ледниками, представляется следующим. В озерной чаше постепенно накапливается вода, уровень ее поднимается, пока не достигнет критической отметки. Озера практически не опорожняются путем простого перелива через ледяную плотину. Далее, активно воздействуя на ледяной барьер, вода стремится проложить себе путь в слабых местах запрудной системы. При этом реализуются все возможности: эффект всплывания ледяных блоков, гидростатическое давление, термическое расширение каналов стока. Затем прорыв развивается лавинообразно, так как тепла, выделяемого за счет превышения температуры воды над температурой тающего льда и, главное, перехода в тепловую энергию водного потока, движущегося через незначительный внутриледный или подледниковый канал, достаточно, чтобы за относительно короткий промежуток времени выработать туннель, способный обеспечить катастрофический сброс воды из озера. Какие-либо ограничения связаны только с падением уровня озера.

После катастрофического сброса наступает период, когда приток воды в озерную котловину и отток из нее одинаков. С наступлением холодов приток воды прекращается и туннель постепенно перекрывается. В следующий теплый сезон все может повториться, если не будут нарушены условия существования озера или силы, удерживающие его в стационарном состоянии, по какой-либо причине не восторжествуют над силами прорыва.

Процесс опорожнения озера определяется увеличением площади поперечного сечения туннеля и падением гидростатического напора по мере сработки объема озерной воды. Размер туннеля при прочих равных условиях определяется количеством уже ушедшей воды, поэтому расход истечения Q и объем воды в озере W тесно связаны между собой. Эта связь определена уравнением:

$$Q = \alpha \left\{ \frac{\rho_0 g}{\rho l} \left[(h + x) (W_0 - W) + \frac{a}{m+1} (W_0^{m+1} - W^{m+1}) \right] \right\}^{5/4} \sqrt{a W^m},$$

$$x = \frac{C_0}{g} t \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{4000 \alpha^{0.3} l (a W^m)^{0.15}}{Q^{0.55} \rho_0 C_0} \right] \right\}.$$

Здесь h — превышение точки входа в туннель над точкой выхода из него, l — длина туннеля, W_0 — объем водоема к моменту прорыва, t — температура воды в озере; кроме того, предполагается, что глубина озера у входа в туннель (т. е. максимальная глубина у ледяной плотины) связана с объемом воды соотношением $H = a W^m$, где a и m — морфометрические параметры озерной чаши. Остальные коэффициенты уравнения являются физическими константами: $\rho_0 = 1000$ и $\rho = 850 \div 910$ кг/м³ — соответственно плотность воды и льда; $g = 9,81$ м/с² — ускорение силы тяжести; $c_0 = 4190$ дж/кг · град — удельная массовая теплоемкость воды; $r = 334\,000$ дж/кг — удельная теплота плавления льда. Коэффициент α , оцениваемый исходя из наилучшего соответствия модели и действительности, тесно связан с длиной ледяного туннеля: $l = 0$ км — $\alpha = 2,7$; 2 км — 2,0; 5 км — 1,0; 10 км — 0,4; 50 км — 0,07.

Процесс движения воды через туннель носит дикий, конвульсивный характер. И. Е. Рыжов, посетивший в 30-е годы ледник Иныльчек, оставил описание прорыва озера Мерцбахера.

„Непрерывный гул подледного потока усиливался все больше и больше. Ледник содрогался, словно пытаясь приподняться со своего ложа. В одном месте из трещины вода была фонтаном, с оглушительным ревом поднимаясь над льдом... Тяжелые бленны, похожие по своей ритмичности на удары пульса, сотрясали грандиозную ледяную толщу... Долина была залита водой. Яростные потоки рвались из-под ледника, с грохотом перекатывая тяжелые камни. Глыбы льда вырывались изредка вместе с водой и стремительно уносились в хлопьях грязной пены; то в одном, то в другом месте вдруг раздавался грохот обвала. Подмытые водой, рушились своды ледника, закупоривая невидимые туннели. Так вот как выглядит прорыв озера!“.

7. ТРЕВОЖНАЯ ЖИЗНЬ МОРЕННЫХ ОЗЕР

Но озеро стремится вперед... Бес- сильно падает с крутых склонов и, совершив свой последний подвиг, зати- хает.

Сельма Лагерлёф. Сага о Йёсте Берлинге

Конечно-моренные образования представляют собой нагро- мождения рыхлообломочной породы, часто прослоенные блока- ми и линзами льда, отделившимися или сохранившими связь

с телом основного ледника. Моренный рельеф, осложненный многочисленными грядами, холмами, ложбинками, воронками и блюдцеобразными понижениями, именно вследствие присутствия в морене погребенного льда и развития термокарстовых процессов отличается исключительной изменчивостью. Жизнь морены и моренных озер очень динамична и изобилует многими неожиданными сюрпризами. Гляциологи сейчас имеют гораздо лучшее представление о деятельности ледника, чем о созданных им моренных отложениях. Моренные озера редко удостоивались специального внимания гляциологов и лимнологов, так как, видимо, воспринимались лишь в качестве дополнительного украшения моренно-ледникового высокогорного пейзажа.

Несомненно, что прорывы моренных озер случаются повсеместно и не так уж редко. В период повышения температуры воздуха и продвижения нулевой изотермы высоко в горы обострение селеопасной ситуации идет по двум направлениям: усиливаются термокарстовые проявления, влекущие за собой разного рода изменения во внутриледниковой системе каналов стока, просадку мерзлой обломочной породы и ослабление озерных дамб, и резко увеличивается приток талых вод в озерные котловины, что влечет за собой опасное переполнение последних. Именно при сочетании этих двух процессов ситуация становится угрожающей и достаточно незначительного перелива, чтобы озерная плотина разрушилась, или начавшегося истечения воды чтобы система гротов и туннелей стремительно расширилась и озеро излишне быстро опорожнилось.

Языки Туюксуйской группы ледников на северном склоне Занлийского Алатау под Алма-Атой упираются в мощный массив рыхлообломочных моренных отложений. Двумя уступами высотой 100 и 150 м этот массив спускается к довольно пологой (около 5°), широкой и короткой (около 1,5 км) троговой долине Мынжилки. Среди моренных нагромождений в диапазоне высот от 3350 до 3450 м лежит группа небольших озер. Главное из них, озеро № 2, расположено непосредственно у конца языка Центрального Туюксуйского ледника. Рождение его, видимо, относится к 20-м годам. Объем озера непрерывно увеличивался, причем за счет роста как площади, так и глубины.

Ниже долины Мынжилки на высотах от 3000 до 2100 м русло Малой Алматинки проходит через селевой очаг, выработанный в толще древнеморенных и прочих рыхлообломочных отложений. Очаг длиной 4 км имеет довольно равномерно выполаживающийся продольный профиль со средним уклоном около 13°, на отдельных участках — до 19°.

Достоверно известно, что прорывы озера № 2 сформировали селевые потоки в 1951 и 1973 гг.

В 1951 г. объем озера № 2 составлял 20 тыс. м³. В 16 ч 20 августа произошло опорожнение этого озера через внутриморенный канал. Максимальный расход при входе в малоалматинский селевой очаг составил 15 м³/с, а общая продолжитель-

ность истечения не превышала четырех часов. Селевой поток нес камни в несколько десятков тонн и до поселка Медео уничтожил все мосты, затем постепенно истощился.

С 8 июля 1973 г. интенсивность притока тепла к поверхности высокогорной части Занлийского Алатау непрерывно возрастала. К 14 июля средняя суточная температура на метеорологической станции Мынжилки (3036 м) достигла 13°C , а высота нулевой изотермы (утром 13 июля) поднялась до 4800 м, что случается редко.

Днем 15 июля начался сброс воды из озера № 2 в озеро № 3, уровень которого был на 7—8 м ниже. По-видимому, переливу предшествовали просадочные явления в теле моренной перемычки между озерами. В дальнейшем эта перемычка быстро разрушилась и образовался проран шириной 30 м в верхней части. Котловина озера № 3 объемом лишь несколько тысяч кубических метров не могла быть серьезным препятствием на пути масс воды, хлынувших в нее из озера № 2, и в 17 ч 54 мин поток воды устремился вниз по откосу морены.

Объем воды в озере № 2 к 15 июля составил 260 тыс. м³, после же прорыва в озерной котловине осталось 36 тыс. м³. Уровень озера опустился на 5,8 м, а максимальный расход воды был оценен в 350 м³/с.

Объем обломочной породы, сброшенной водой с морены и отложенной на дне троговой долины Мынжилки, оказался небольшим (140 тыс. м³), что объясняется мерзлым состоянием морены и тем фактом, что целые массивы льда оказались лишь присыпанными моренным материалом. При взгляде на морену из долины Мынжилки на следующий день после прорыва бросалась в глаза сверкающая на солнце полоса чистого льда по пути движения воды. Наносоводный поток, освободившийся от влекомых наносов на участке малых уклонов долины Мынжилки и в верхнем бьефе плотины, достиг последней в 17 ч 57 мин. Через три-четыре минуты плотина была прорвана и вода устремилась в Малоалматинский селевой очаг, где в результате ее взаимодействия с ПСМ был сформирован мощный грязекаменный поток, спустившийся с большой скоростью (в среднем 10 м/с) по руслу Малой Алматинки. Движение его носило исключительно бурный, лавинообразный характер. Над потоком клубилось облако грязевой пыли. Перекос поверхности на поворотах достигал $15\text{--}20^{\circ}$, что при 60—70-метровой ширине русла составляло разницу в уровнях на разных берегах до 20 м. В 1600 м выше завальной плотины у туристской базы Горельник находилось селезащитное сквозное металлическое сооружение. Грязекаменная лавина лишь как бы споткнулась о него, выбросив при этом на многие десятки метров вокруг громадные камни.

В 18 ч 15 мин грязекаменный вал 15-метровой стеной с грохотом, в грязевом облаке обрушился в селехранилище. Взрывная противоселевая плотина в Медео в данном случае исполнила роль абсолютного оружия. Не хочется думать о послед-

ствиях, которые мог бы причинить селевой поток нижележащей долине и городу.

Дно ущелья Малой Алматинки, столь хорошо знакомое жителям столицы Казахстана и многочисленным туристам, неизнаваемо изменилось: ее рассек надвое мощный послеселевой каньон со средней глубиной 12—15 м и средней площадью поперечного сечения около 600 м².

Объем селевого потока составил 3,8 млн. м³ при средней плотности грязекаменной массы 2350—2400 кг/м³. Характер гидрографа прорыва и анализ сейсмограммы дают основание полагать, что основная часть селевой массы была выброшена в селехранилище в течение всего каких-то 10 мин. Максимальный расход селевого потока по разным оценкам заключается в интервале 10 ± 3 тыс. м³/с.

Моренное озеро ледника ТЭУ-Северный в бассейне Средне-го Талгара на северном склоне Заилийского Алатау образовалось в 30—40-х годах. Еще в 1968 г. это было небольшое озерко продолговатой формы длиной 100 м и шириной 13 м с запасом воды не более 1 тыс. м³. В 1973 г. объем озера при максимальном наполнении достигал уже 24 тыс. м³, а в 1974 г. — 26 тыс. м³.

Первый грязекаменный поток сформировался здесь 15 июля 1973 г. Опорожнение озера происходило в течение 4—5 ч через туннельный ход в теле ледяной перемычки, покрытой чехлом моренных отложений. Объем вытекшей из озера воды составил 21 тыс. м³, сформировавшейся селевой массы — 210 тыс. м³. На фронтальном уступе морены на месте слабовыраженной ложбины образовался 30-метровый селевой врез длиной 850 м и уклоном до 22° с крутыми, иногда обрывистыми, бортами. За первым последовал целый ряд прорывов: 16, 18, 19, 29 и 30 августа. Объем селей не превышал 90 тыс. м³.

В 1974 г. уровень озера поднялся на полметра. 15 июля (какое совпадение!) в 15 ч 20 мин начался сброс озерной воды. Максимальный прорывной расход был оценен в 30 м³/с, уже через 8 мин он снизился наполовину. Вначале вода на участке длиной около 50 м полностью поглощалась ПСМ. В 15 ч 50 мин вниз по очагу промчался первый селевой вал с расходом около 100 м³/с, затем последовали второй и третий. Объем селевой массы, выброшенной на поле выноса, достиг 40 тыс. м³. Врез заметно углубился, а в его верхней части обнажился погребенный лед. При прорыве обрушилась кровля сбросного туннеля.

Прорывы и селевые потоки повторились 21 июля и 2 августа. Максимальные расходы воды на этот раз не превышали соответственно 5 и 4 м³/с, в то время как селевые достигли 200—250 и 300 м³/с, что было связано с исключительно высокой предварительной водонасыщенностью ПСМ. Скорость движения фронта грязекаменного потока достигла 13—15 м/с, а измеренная плотность селевой массы 2370 кг/м³.

13 июля 1968 г. прорвалось моренное озеро в верховьях ручья Кольтор, расположенное на высоте 3300—3400 м на северном склоне Киргизского хребта. В результате прорыва по

рекам Кольтор, Иша и частично Аксу прошел грязекаменный поток. В этом же районе 22 июня 1953 г. прорвалось моренное озеро в верховьях реки Тезтор, в результате чего грязекаменный поток скатился по русловой системе Тезтор — Адыгене — Алаарча. Объем озера достигал 80 тыс. м³, а прорывной расход — 50 м³/с. Объем селевой массы, вынесенной в долину Алаарчи, составил 0,3 млн. м³.

В ночь со 2 на 3 августа 1962 г. мощный грязекаменный поток двигался по левому притоку реки Гунт (Бадахшан) — реке Гарджвиндара. Конец ледника, покрытый мощным моренным чехлом, длиной около 100 м неожиданно обломился и осел, перекрыв путь воде. Образовалось временное моренное озеро объемом 50—80 тыс. м³. 2 августа в 23 ч из ущелья вырвался первый селевой вал, за которым через 30—40-минутные промежутки времени последовали остальные четыре-пять, но меньшие по величине. К 3 ч ночи 3 августа селевой процесс затух. Грязекаменные выносы Гарджвиндары подпрудили реку Гунт и образовали озеро длиной до 1,5 км и глубиной до 12 м. Три крупнейших валуна на конусе выноса имели объем 16, 36 и 38 м³.

По сообщениям альпинистов, восходивших на пик Евгении Корженевской (7105 м), грязекаменные потоки образовались при прорыве моренных озер в боковых ущельях у реки и у ледника Фортамбек (Западный Памир). Это случилось 4 августа, между 11 и 17 августа 1953 г. и 29 июля 1966 г. 18 сентября 1973 г. в 14 ч 30 мин небольшое моренное озеро, лежащее на высоте более 4000 м на склонах пика Василевского (6650 м, бассейн ледника Бивачного, приток Федченко), прорвалось, в результате грязекаменная масса обрушилась с более чем 100-метровой высоты по очень крутому скальному кулуару.

Начиная с 1969 г. гляциальные сели формировались почти ежегодно, когда прорывалось моренное озеро Кахаб-Росона в бассейне реки Темпр на стыке хребтов Нукатль и Кочеда в Дагестане. Объем озера, питаемого небольшим каровым ледничком площадью около 0,3 км², в 1976 г. достигал 390 тыс. м³. Опораживалось озеро через туннельную систему в погребенной части ледника.

Селевой поток, возникший при прорыве моренного озера Палькакоча в верховьях реки Коуп (Кордильера Бланка, Перу), разрушил 13 декабря 1941 г. треть города Уарас. 17 января 1945 г. при подобных же обстоятельствах была опустошена значительная территория в районе Чавин-де-Уантар на восточном склоне Кордильеры Бланка, причем под слоем грязекаменных отложений было погребено знаменитое Кастилло, выдающееся архитектурное сооружение одной из древнейших перуанских цивилизаций. 20 октября 1950 г. произошло опорожнение моренного озера Янкаруриш у конца ледника Коган у подножия горы Невадо-Альпаймайо (6120 м).

Моренное озеро, находящееся в долине Гадмен у оконечности ледника Штейн, недалеко от перевала Зустен (2262 м) в

Унтервальденских Альпах, в результате переполнения озерной чаши, повреждения моренной плотины и опорожнения 29 июля 1956 г. вызвало сель, прошедший по реке Гадмервассер (правый приток реки Аар).

22 августа 1954 г. прорвалось моренное озеро, расположенное в месте бывшего слияния ледников Чиейва и Розег (ныне ледники разъединились) в Верхнем Энгадине (верховья реки Инн, Ретийские Альпы).

8. ИЗ ЧРЕВА ГЛЕТЧЕРОВ

Кто вас воззвал из сумрака и смерти,
Из ледяных и темных недр воззвал
И ринул вниз с зубчатых черных круч..?

*Сэмюель Тэйлор Кольридж. Гимн перед восходом солнца
в долине Шамони*

Ледник — это не просто глыба льда, принявшая форму дна той долины, где она залегает. Внутри ледника обычно имеется скрытая от наших глаз целая система полостей и туннелей, свободных или заполненных водой, находящейся иногда даже под значительным давлением. Если тот или иной ледник подвергся тщательному и детальному изучению, особенно если последнее проводилось с подлинной изобретательностью, энтузиазмом и применением новейших средств исследований, то почти неизбежно появление сообщений о присутствии в его толще более или менее значительных пустот.

Подробно были обследованы большие пещеры на леднике Стивенс, который раньше соединялся с ледником Парадайс (юго-юго-восточный склон горы Рейнир, Каскадные горы, США). Тело ледника длиной менее 2 км пронизано несколькими километрами пещерных коридоров, в результате чего ледник оказался полым на 0,1 часть своего объема. Средняя их ширина 6 м, высота 3 м, наибольшая из полостей в момент обследования имела размеры 76×27×8 м. Подобные пещеры отмечены в леднике Карбон, расположенном на противоположном склоне горы Рейнир, во льдах Свартисепа (Норвегия), в аляскинских глетчерах Бирон, Маляспина, Мартин-Ривер, в леднике Карабаткак на северном склоне Терской-Алатау у озера Иссык-Куль. Ледниковые пещеры есть и в таких областях покровного оледенения, как Гренландия и Антарктида. В 1971 г. было обследовано около 700 м пещерной системы в леднике Лливиллин, на ледниковом поле Джуно у границы Аляски и Канады. Коридоры ее имеют высоту от 0,5 до 6 м;

отдельные залы связаны с поверхностью ледниковыми „мельницами“ (вертикальными колодцами, пробуренными во льду камнями при воздействии воды).

Интересные наблюдения были проведены в гидравлической внутриледниковой системе ледника Южный Ледьюк (северная часть Берегового хребта, Канада). В 1957 г. туннели рудника Грандюк были соединены горизонтальной штольной, пройденной в скальной породе на высоте 754 м над уровнем моря до тела ледника. Точка контакта штольни с ложем ледника находилась в 2 км выше конца ледника и в 6 км от его истоков, на глубине 150 м под поверхностью льда. Весной 1958 г. после того, как оборудование было снято, шахту затопили ледниковые воды. По наблюдениям в 1959 и 1960 гг. разница в уровне воды достигала 105 м. В 1962 г. шахта на контакте с ледником была перекрыта бетонной стенкой с тремя 10-сантиметровыми отверстиями, оборудованными датчиками давления. Предполагалось, что уровень воды в шахте, или давление у бетонной переборки, приблизительно соответствует уровню свободной поверхности воды в дренажной системе в верховьях ледника. Резкие скачки давления были связаны с сильными дождями, выпавшими на ледник. В июле 1962 г. на северном крае ледника Южный Ледьюк были обнаружены два туннеля, заполненные водой.

Колебания давления до 10 м высоты водного столба за час и 130 м за сутки были отмечены с помощью манометров в ледниковых мельницах на леднике Уайт на острове Аксель Хейберг в Канадском арктическом архипелаге.

Все сказанное свидетельствует о том, что во внутриглетчерных дренажных системах находятся большие запасы воды под высоким давлением. Это подтверждают и случаи фонтанирования напорных внутриледниковых вод.

14 июля 1953 г. участники экспедиции Оксфордского университета наблюдали фонтан на леднике Фон-Постбре на Западном Шпицбергене. Фонтанирующая ледниковая мельница находилась в 6 км от конца ледникового языка, примерно посредине последнего, на высоте около 200 м над уровнем моря. Через каждые 10 мин из нее вырывалась струя воды высотой 7—10 м. При посещении данного места через четыре недели в 10 км от конца ледника был обнаружен новый фонтан.

27 августа 1962 г. в 2 ч дня на Большом Алечском леднике (Бернские Альпы) был отмечен мощный фонтан воды высотой приблизительно 85 м.

30 июня 1966 г. в 11 ч дня наблюдался 5-метровый фонтан на леднике Кэскавульш в горах Святого Ильи в Канаде.

Ледниковые полости, заполненные водой, встречены на самых различных ледниках и в самых различных районах.

При проходке туннеля в леднике на горе Юнгфрау (4158 м, Бернские Альпы) строители встретили емкость, из которой в туннель прорвалось несколько тысяч кубических метров воды. Высота емкости достигала 15 м. Подобный же туннель на вы-

соте около 4000 м на Брейтхорне (4165 м, Пеннинские Альпы) вскрыл огромный резервуар, вода из которого вытекала в туннель в течение двух месяцев. Заполненные водой пустоты обнаружены также на леднике Аржантьер в массиве Монблан. Р. В. Хонин в августе 1960 г. с языка ледника Туюксу (Заилийский Алатау) наблюдал мощную струю воды на конце висячего ледника Партизан, образовавшуюся после отвала глыбы льда.

Внутриледниковые емкости, заполненные водой, не могут время от времени не прорываться.

В Заилийском Алатау хорошо известен прорыв 7 августа 1956 г. на леднике Туюксу под Алма-Атой. Выброс воды сопровождался выносом рыхлообломочного материала, слагающего тело морены. При этом возникли две обвальные воронки, главная и западная, в основании которых обнажились выходы ледниковых туннелей. Основная масса твердого материала задержалась в долине Мынжилки, а прорывные воды, по подсчетам 1,5—2 млн. м³, устремились в Малоалматинский селевой очаг (см. этюд 7). Несколько дней после прорыва расходы воды намного превышали обычные. Следовательно, можно говорить об излиянии огромной для ледника Туюксу массы воды в течение длительного (более 100 ч) времени, единственным местом сосредоточения которой могли быть лишь внутриледниковые емкости, так как моренные озера после селя сохранились. Таким образом, грязекаменный поток 1956 г. сопровождался мощным и длительным послеселевым паводком. Максимальный расход воды при прорыве ледниковых вод оценен приблизительно в 30—40 м³/с.

Грязекаменный поток окончательно сформировался, подойдя к створу турбазы Горельник. Двигаясь по руслу Малой Алматинки и далее по ее западной ветви, реке Весовке, вплоть до линии железной дороги, поток постепенно истощался. Основная масса крупнообломочного материала отложила на участке Медео—дамба. Общий объем селевых выносов достиг 1 млн. м³.

Аксайский ледник в бассейне реки Алаарчи на северном склоне Киргизского хребта известен частыми прорывами своих скрытых водоемов. Выход Аксая в долину Алаарчи отмечен крупным селевым конусом выноса, изборожденным селевыми руслами различного возраста. Селевые потоки были зарегистрированы 5 июля 1960 г., 29 июля 1961 г., 21 августа 1965 г., 18 июня 1966 г., 13, 24 и 25 июля 1968 г., 24 июля 1969 г., 18 июля и 2 августа 1970 г.

Многочисленны прорывы внутриледниковых вод в Альпах, в частности в массиве Монблан на ледниках Тэт-Русс, Мер-де-Глас и Боссон. Небольшие прорывы в восточной части последнего происходят каждые 4—5 лет, относительно большое наводнение имело место 11 августа 1892 г.

Широко известна катастрофа в долине Сен-Жерве, вызванная прорывом 100—200 тыс. м³ воды, скопившейся в полостях

небольшого ледника Тэт-Русс. Случилось это между часом и двумя ночи 12 июля 1892 г. Прорывные воды ниже местечка Бьоннассе устремились в узкое ущелье, наклоненное под углом 16°, и очистили его от обломочной породы. Следы селя остались на высоте 30—35 м над скальным дном каньона. Грязекаменная масса объемом 0,5—1 млн. м³ отложилась в нижней части долины Сен-Жерве слоем до 3,5 м. Здесь были разрушены одноименный курорт и часть селения Бьонне. Поток вышел в долину Арва. Факт скопления большой массы воды внутри ледника Тэт-Русс в то время считался загадочным.

В августе 1943 г. мощный селя прошел по реке Борнь, левому притоку Роны, в долине Валь-д'Эренс. Причиной был прорыв внутриглетчерных вод ледника Мон-Мин.

В ноябре 1930 г. с ледника Йенгуцгар в Каракоруме внезапно хлынули потоки воды и грязи, затопившие сельскохозяйственные поля и обрушившиеся в реку Хиспар (бассейн реки Инд).

Ледник Франца-Иосифа на западном склоне Южных Новозеландских Альп после сокращения в течение ряда лет с июня 1965 г. стал быстро наступать. 19 декабря (лето!) этого же года произошел прорыв вод, накопившихся в ледниковых полостях. Масса воды, льда и обломочных отложений была сброшена в русло реки Ванхо. Следы паводка оказались на 6 м выше нормального уровня реки, а толщина отложений в ее русле достигла 30 м. На поверхности ледника образовался желоб длиной 370 и шириной 90 м, заканчивавшийся гротом. Ледник потерял 3 млн. т льда. Прорыву талых вод способствовал сильный дождь, выпавший за два дня до этого. К вечеру 20 декабря выброс воды из ледника повторился.

9. РОЖДЕНИЕ ПОТОКА

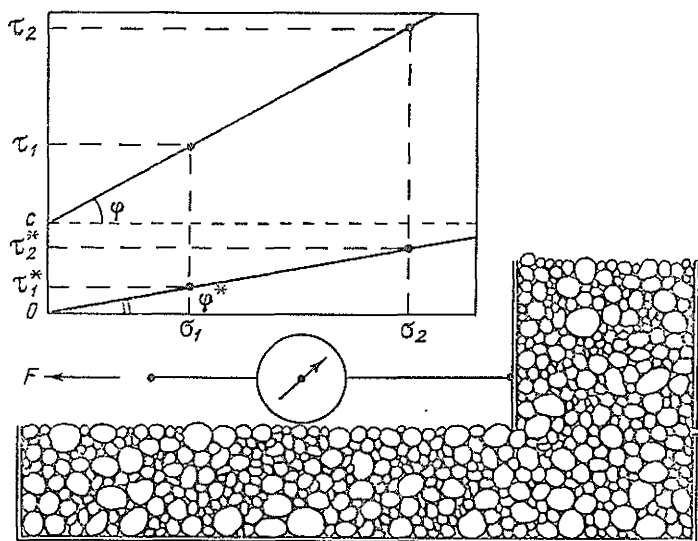
Первые 203 секунды звучания.
Густав Малер. Первая симфония, финал
Горам, как небу, дан живой язык,
Разноречивый, бурный и могучий,
Ликиют Альпы в этот грозный миг...
Гудит земля, безумствуют стихии...

Джордж Гордон Байрон. Паломничество Чайльд Гарольда

Традиционная формула, которая присутствует практически во всех публикациях о селевых потоках, гласит, что для образования последних необходимо сочетание трех условий: наличия рыхлой горной породы, воды и уклона. Я встретил ее, например, у немецкого геолога Ф. Фреха в статье, датированной

1898 г. Возникает важнейший для селеведения вопрос: какой уклон является достаточным для образования селей?

Соорудим очень простой прибор (сделаем это мысленно, но при желании это нетрудно воплотить и в действительность). По верхним боковым кромкам длинного лотка, как по рельсам, может легко скользить значительно более короткая обойма (ящик без дна) такой же ширины. Обе емкости заполнены



Прибор и экспериментальный график для определения сдвиговых характеристик рыхлообломочной породы.

песком, гравием, их смесью или любым другим насыпанным грунтом. К обойме прилагается и при этом измеряется (динамометром) сила F . Трением между стенками лотка и обоймы пренебрегаем, нужно позаботиться, чтобы оно было возможно меньшим (подшипники, смазка). Тогда сдвигу обоймы препятствуют силы взаимодействия в сыпучей среде вдоль поверхности сдвига.

Сила сопротивления сдвигу зависит от свойств сыпучей породы и определяется очень простым соотношением.

$$F = Pf + F_c.$$

здесь P — вес (сила тяжести) породы в обойме, F_c — сила сцепления (зацепление между выступами обломков породы, склеивание и цементация крупных частиц более мелкими, например глинистыми) и f — безразмерный коэффициент внутреннего трения, внутреннего — потому, что последнее осуществляется между многими и многими частицами, как бы внутри

среды. Очень удобно полагать, что этот коэффициент численно равен тангенсу угла внутреннего трения. К логике этого понятия мы вернемся чуть позже.

Чтобы получить более общее выражение, не зависящее от размеров обоймы, поделим все члены предыдущего уравнения на величину площади основания блока сыпучей породы:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c.$$

Теперь каждое слагаемое в новом соотношении измеряется в единицах давления (напряжения), т. е. в ньютонах на квадратный метр. Обозначения здесь таковы: τ — предельное сопротивление сдвигу, σ — нормальное давление или сжимающее напряжение, c — сцепление, φ — угол внутреннего трения. Записанное соотношение отображает так называемый закон Кулона, формулировка которого датируется 1776 г.

Вернемся к нашему прибору. Итак, к обойме прилагается сила. По достижении определенного значения τ состоится сдвиг. Теперь обойма с породой будет перемещаться с некоторым ускорением, и, если бы лоток не был ограничен в длину, она достигла бы определенной постоянной скорости (силы движущая и сопротивления уравновесятся). Однако если прилагаемую силу постепенно уменьшить, то при каком-то пороговом значении τ^* обойма остановится. Повторив опыт при другой толщине грунта в обойме или же при дополнительной пригрузке, т. е. при другом σ , можно определить оба сдвиговых параметра закона Кулона — угол внутреннего трения и сцепление. Это и является конечной целью нашего эксперимента со сдвиговым прибором.

Результаты эксперимента удобно анализировать с помощью графика, где по горизонтальной оси откладываются значения σ , а по вертикальной — τ и τ^* . Последние не равны друг другу, второе всегда меньше первого. Действительно, различают два вида внутреннего трения: статическое и динамическое. Поэтому можно говорить и о двух значениях угла внутреннего трения. Первое характеризует силу сопротивления сдвигу, которая преодолевается в момент начала движения, второе же соответствует силе трения, действующей в процессе движения и торможения сыпучей породы. В последнем случае соотношение Кулона упрощается:

$$\tau^* = \sigma \operatorname{tg} \varphi^*.$$

Собственно говоря, сдвиговые параметры обломочной породы являются не константами, а функциями ее влажности. Однако селеведение, имея дело с водой и породой одновременно, оперирует этими параметрами (c , φ , φ^*) именно как константами, но определенными под водой, в последнем случае они всегда ниже, чем у грунта в сухом или влажном состоянии.

Для понимания сущности селевых процессов важно развить эти соображения дальше, но сначала перечислю разного рода показатели, определяющие интересующую нас ситуацию:

порода: ρ кг/м³ — плотность вещества; ε — пористость (отношение объема пор к общему объему обломочной породы); θ — объемная влажность (отношение объема воды, содержащейся в обломочной породе, к общему объему последней); углы внутреннего трения и сцепление: $\varphi_{\text{сух}}, c_{\text{сух}}$ н/м² — сухой породы, φ_0, c_0 — влажной, φ, c — затопленной водой; h м — толщина слоя;

вода: $\rho_0 = 1000$ кг/м³ — плотность; β — относительная (в долях h) глубина в толще породы; H_n — глубина потока над поверхностью породы; α° — угол наклона.

Рассмотрим соотношения между силами, пытающимися привести нашу обломочную породу в движение и препятствующими этому. И сейчас и впредь я иногда буду говорить о силе, а на самом деле для удобства оперировать с напряжением или давлением, т. е. с силой на единицу площади. Уравнения, определяющие эти силы, в зависимости от условий взаимодействия воды и горной породы, могут быть построены из таких „кирпичиков“:

давление, оказываемое на горизонтальную площадку толщей обломочной породы,

$$[1] = gh \rho (1 - \varepsilon);$$

то же, но под водой (закон Архимеда),

$$[2] = gh (\rho - \rho_0) (1 - \varepsilon);$$

дополнительное давление за счет влажности обломочной породы

$$[3] = gh \rho_0 \theta;$$

давление, оказываемое на горизонтальную площадку водой, заполняющей обломочную породу,

$$[4] = gh \rho_0 \varepsilon;$$

дополнительное давление, оказываемое толщей воды над поверхностью породы,

$$[5] = gH \rho_0.$$

Здесь везде g — ускорение силы тяжести. Сложим из перечисленных „кирпичиков“ уравнения для различных ситуаций. Следует помнить, что если тело лежит на наклонной плоскости, то давление, им оказываемое, может быть разложено на составляющие — одну, направленную вдоль линии уклона (давление умножается на $\sin \alpha$), и вторую, перпендикулярную ей (давление умножается на $\cos \alpha$).

Итак (плюсом отмечено сдвигающее и минусом препятствующее напряжение),

сухая порода

$$(1) \quad \sigma(+) = [1] \sin \alpha, \quad \sigma(-) = [1] \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi_{\text{сух}} + c_{\text{сух}};$$

влажная порода

$$(2) \quad \sigma(+) = ([1] + [3]) \sin \alpha, \quad \sigma(-) = ([1] + [3]) \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi_0 + c_0;$$

влажная порода, подтопленная водой до глубины βh ,

$$(3) \quad \sigma(+) = [1] + [3] (1 - \beta) + [4] \beta \sin \alpha,$$

$$\sigma(-) = [1] (1 - \beta) + [2] \beta + [3] (1 - \beta) \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + c;$$

порода, полностью заполненная водой,

$$(4) \quad \sigma(+) = ([1] + [4]) \sin \alpha, \quad \sigma(-) = [2] \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + c;$$

порода, над поверхностью которой течет водный поток,

$$(5) \quad \sigma(+) = ([1] + [4] + [5]) \sin \alpha, \quad \sigma(-) = [2] \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + c.$$

Теперь уместно выполнить обещание о разъяснении логики отождествления коэффициента внутреннего трения с тангенсом угла внутреннего трения. Из условия равенства сдвигающей и удерживающей сил для сухой сыпучей породы, для которой можно с чистой совестью пренебречь сцеплением, получим

$$[1] \sin \alpha = [1] \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi_{\text{сух}}.$$

В результате имеем очень привлекательный результат

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \varphi_{\text{сух}} \quad \text{или} \quad \alpha = \varphi_{\text{сух}}.$$

Таким образом, угол внутреннего трения — это предельный угол откоса сыпучей породы, когда сдвиг еще не происходит; малейшее увеличение угла наклона немедленно повлечет за собой осыпание породы. Если же, наоборот, при постепенном уменьшении угла наклона имеет место переход от движения к покою, то угол, зафиксированный в момент остановки, называется равным динамическому углу внутреннего трения φ^* , или, как его иногда называют, углу естественного откоса. Однако под последним не следует понимать угол откоса, формирующийся при последовательном падении отдельных частиц, т. е. в условиях, далеких от их массового движения с проявлением „внутреннего“ трения.

Приравняв $\sigma(+)$ и $\sigma(-)$ друг другу, можно получить критические значения ряда величин, при которых осуществляется сдвиг. Рассмотрим такие возможности.

Критические уклоны

Случай (4) при решении уравнения относительно угла наклона приводит к результату

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{(\rho - \rho_0) (1 - \epsilon) \operatorname{tg} \varphi + \frac{c}{gh \cos \alpha_1}}{\rho (1 - \epsilon) + \rho_0 \epsilon}.$$

Рассмотрим другой вариант. Ситуация во всем подобна предыдущей, за исключением того факта, что обломочная порода уже каким-то образом приведена в движение, и надо только определить минимальный угол наклона, при котором порода еще будет двигаться, или, что то же самое, максимальный угол, при котором порода остановится. Ответ отыскивается таким же

способом, как и в первом варианте, но статический угол внутреннего трения должен быть заменен динамическим, а в числителе последнего выражения должен исчезнуть член, включающий сцепление:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{(\rho - \rho_0)(1 - \varepsilon)}{\rho(1 - \varepsilon) + \rho_0 \varepsilon} \operatorname{tg} \varphi^*.$$

Таким образом, для толщи породы с данными свойствами определены критические углы наклона, разбивающие весь диапазон уклонов на три интервала, каждый из которых отвечает возможности проявления типа селевого процесса — сдвигового, транспортно-сдвигового или транспортного.

Сдвиговый селевой процесс

$$\boxed{\alpha > \alpha_1.}$$

Обломочная порода заполняет ложбину, угол наклона которой превышает первый критический. При обводнении ПСМ (потенциального селевого массива) в его толще возникает поток грунтовых вод.

Поскольку, приводя (и сейчас, и ранее) некоторые простейшие математические уравнения, я преследую цель более компактно и четко пояснить суть дела, а вовсе не стремлюсь дать читателю в руки конкретный расчетный математический аппарат, то и на этот раз поясню основное соотношение, определяющее уровень потока грунтовых вод в толще ПСМ, предельно упрощая ситуацию.

Будем полагать, что приток воды в ПСМ одинаков по его длине и равен q м³/(м·с), что он не ограничен во времени и что относительная глубина затопления ПСМ связана с площадью поперечного сечения грунтового потока соотношением $\beta = f_1(l)\omega$, где l — расстояние, отсчитываемое от начала (сверху) ПСМ, и $f_1(l)$ — убывающая функция l , в первую очередь в связи с ростом ширины грунтового потока вниз по ложбине. Тогда

$$\beta = f_1(l) l \frac{q}{k \sin \alpha}.$$

Здесь k — водопропускная способность (коэффициент фильтрации) ПСМ, которая измеряется в метрах в секунду.

Возможность же сдвига ПСМ и, следовательно, формирование грязекаменного селя, определяется переходом величины β через ее критическое значение. К последнему нас со всей очевидностью приводит случай (3) при $\sigma(+) = \sigma(-)$:

$$\beta_{\text{кр}} = \frac{\left[\frac{\rho}{\rho_0} (1 - \varepsilon) + \theta \right] \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha} - 1 \right) + \frac{c}{g \rho_0 h \sin \alpha}}{(e - \theta) + [1 - (e - \theta)] \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha}}.$$

Сопоставление графиков функций $\beta = f_2(l)$ и $\beta_{\text{кр}} = f_3(l)$ (поскольку $\beta_{\text{кр}}$ при прочих равных условиях определяется вели-

чинами h и a , а последние связаны с l) позволяет оценить ситуацию — насколько реальна угроза развития сдвигового селевого процесса, возможность проявления которого отображается неравенством

$$\beta > \beta_{кр}.$$

Проявления сдвигового селевого процесса очень многообразны. Местные природные условия — тип рельефа, характер почв и растительности, состав и свойства горных пород, особенности гидрографии — придают ему многие специфические черты. Тем не менее все возможные варианты селевых очагов, где способен развиваться сдвиговой селевой процесс естественным образом объединены в один генетический тип очагов обводнения.

В ложбинах и кулуарах, заполненных продуктами разрушения, поступающими с окружающих скальных и полускальных гряд и массивов, во время выдающегося ливня первая подвижка ПСМ обычно случается где-либо в их верхней части, где мощность обломочной породы ниже, сама ложбина уже, уклон значительнее. Общая картина формирования грязекаменного потока, как правило, напоминает ту, что мне пришлось наблюдать в июне 1954 г., когда я еще и не предполагал, что к селевым потокам у меня может возникнуть и чисто профессиональный интерес.

Мы с товарищем находились в Западном Тянь-Шане на левом берегу реки Чаткал, в том месте, где в него впадает река Найза. Вторые сутки шел сильный дождь, и мы отсиживались в палатке. Вдруг ставший уже привычным шум реки перекрылся страшным грохотом. Как будто кто-то включил бетономешалку, увеличенную против обычного раз в сто. Невзирая на ливень, мы выскочили наружу и поняли, что были не столь уж далеки от истины. Прямо напротив нас, на противоположном берегу, от верховьев крутопадающей скальной ложбины двигался мощный грязекаменный вал, увеличивающийся буквально на глазах. Стремительно наползая на ПСМ, находящийся уже в состоянии, близком к критическому, вал как бы вбирал его в себя, или, точнее, с этого момента начинал составлять с ним одно целое. Проследовав до конца ложбины, грязекаменная лавина на короткий миг вошла в другое русло, по которому до того несли почти оранжевый поток, размывающий где-то наверху в районе перевала Алям в Коксуйском хребте рыхлые красноцветные породы, и тут же обрушилась в Чаткал. На дне ложбины, где только что прошел сель, протянулась узкая и глубокая рытвина, по которой сочился мутный ручей.

Своеобразен вариант, когда ПСМ сложен продуктами разрушения таких пород, как мергели или глинистые сланцы. В этом случае при увлажнении он приобретает пластические свойства. К чему это приводит?

Благодаря исследованиям Г. М. Беручашвили, прожившему в селевом очаге Шави-Дуруджи многие и долгие дни и ночи,

мы сегодня знаем некоторые подробности формирования грязекаменного селя такого типа.

У основания крутых разрушенных склонов на дне ложбины с относительно небольшим уклоном (всего 12—15°) в результате осыпания, обваливания, оползания, отложения небольших селевых потоков постепенно нарастает мощность ПСМ, который достигает здесь 40-метровой ширины и более чем километровой длины. Если толща обломочной породы превысит 10 м, а погода сырая и дождливая или, наоборот, жаркая и солнечная, но после схода снежной лавины, сделавшей эту породу мокрой, в последней начинается пластическая деформация. Скорость движения при этом невелика, сантиметры в час, но деформация приводит к интереснейшим результатам — ПСМ как бы вспухает и разрыхляется. Это известный факт: рыхлая сыпучая среда при сдвиге уплотняется, а плотная, наоборот, расширяется. В обоих вариантах достигается одна и та же пористость, которая в грунтоведении получила название критической.

Итак, ПСМ разрыхляется. При этом резко усиливается его способность воспринимать влагу. Если в этот момент разразится сильный ливень и к „морально“ подготовленному ПСМ хлынут дождевые воды и обрушатся новые грязекаменные лавины, то он начинает вести себя как оживший организм. Тело ПСМ тяжелеет, как бы наливается силой перед броском. И наконец, на фронте ПСМ движение ускоряется, и вдруг с какого-то момента ПСМ начинает изливаться. При этом фронт неподвижного ПСМ стремительно пятится назад — это вверх по „камне-грязехранилищу“ бежит волна возмущения. А ниже черная масса из погруженных в глинистую пасту сланцевых плиток устремляется в своем ламинарном движении через узкое ущелье к Алазанской долине.

Расход излияния пластического ПСМ зависит от его мощности и ширины и очень приближенно может быть оценен следующей простой формулой:

$$Q \approx kh^{3/2} B.$$

Коэффициент k по величине близок к единице и имеет размерность $m^{1/2}/c$.

При выпадении дождя на поверхность очага рассредоточенного селеобразования рыхлая порода намокает, в многочисленных борозды подтекает дождевая вода и, как следствие, грунт быстро и неизбежно оплывает и растекается в виде селевых микропотоков, которые затем объединяются в едином русле. С увеличением интенсивности дождя растут скорость процесса и число „работающих“ борозд. Одновременно подмываются и уже больше не удерживаются на месте многочисленные глыбы и камни, с большой скоростью они несутся по склонам, еще больше разрушая и перемешивая грунтовую массу. В известном селевом очаге Кокчека на северном склоне Зайлийского Алатау близ Алма-Аты 3 мая 1967 г. мне пришлось видеть, как в течение трех часов во время ливня в состоянии почти свобод-

ного падения одновременно находились сотни крупных и мелких камней и обломков. Непрерывно слышались глухие удары, всплески жидкой грязи, тяжелые вздохи оседающих и шелест оползающих тяжелых масс намокшего мелкозема. Во время совместного обрушения потоки воды и мокрой породы перемешивались, превращаясь в холодную селевую лаву.

Сдвиговый селевой процесс часто захватывает уступы древних и современных морен. Формирование ПСМ здесь связано с протавиванием мерзлой моренной толщи под влиянием тепла, выделяемого стекающей водой. Непосредственной причиной возникновения грязекаменного потока чаще всего служат случайные изменения путей фильтрации воды с тающих ледников. Дополнительное силовое воздействие на талый ПСМ оказывает сам фильтрационный поток.

Типичным примером подготовки и развития сдвигового селевого процесса являются события на Жарсае (бассейн реки Иссык, северный склон Заилийского Алатау). Здесь, на крутом уступе морены, зияют две оползне-селевые ниши, более известные под названием жарсайских воронок. Ранее предполагалось, и я писал об этом в 1976 г., что правая ниша соответствует селю 1958 г., а левая — потоку 1963 г. Это оказалось ошибочным. Б. С. Степанов обратил внимание на фотографию, полученную явно до 1963 г., на которой присутствуют обе воронки. Изучение аэрофотоснимков показало, что правый селевой врез, наверняка обязанный своим появлением также сдвиговому процессу, существовал по крайней мере уже в 1955 г. Следовательно, основной вал селевого потока 6 июля 1958 г. составил ПСМ из левой воронки. Менее мощный селевой поток, но более известный вследствие уничтожения им озера Иссык, 7 июля 1963 г., видимо, был создан транспортно-сдвиговым процессом в главном жарсайском селевом врезе (правой воронке).

Многие горные районы, покрытые лугами и лесами, обычно не относят к селеопасным, хотя за последнее время уже накопилась существенная информация о селевых потоках и в такой местности. Возникновение, жизнь и умирание селевых очагов здесь исключительно своеобразны.

Ситуация представляется такой. Ложбина (балка, лог, в Средней Азии — сай, в Сибири и на Дальнем Востоке — падь), склоны которой поросли густой травой или лесом, может десятилетиями и даже столетиями ждать своего часа, чтобы во время выдающегося ливня принять участие в селеформировании. В результате выброса ПСМ и образования грязевого или грязекаменного потока вдоль тальвега ложбины остаются врезы или обнаженные участки, имеющие четкие очертания. Эти новообразования могут далее выступать в качестве селевых очагов. Однако здесь проявляется четкая особенность, практическое значение которой очень велико: все последующие потоки, образующиеся в таком новом очаге, по размерам, как правило, никогда даже не приближаются к своему прародителю — селю, который сформировался одновременно с образованием очага.

При достаточном увлажнении в таких очагах за несколько десятков лет могут вновь образоваться почвенный и растительный покровы и, следовательно, новый ПСМ.

Как зарождается сель? Попробую дать обобщенную картину.

Лето выдается дождливым. Сильные и моросищие дожди сменяют друг друга. Почва обильно напоена влагой. И вот в довершение всего на склоны гор обрушивается ливень. Грунтовая толща насыщается, тяжелеет, особенно вдоль тальвегов, по низинам. И вдруг где-то там, в ее недрах, происходит то, что мы на бумаге изобразили неравенством $\beta > \beta_{кр}$. Неожиданно раздается утробный чавкающий звук, как бы глубокий вздох земли, и с этого момента события разворачиваются с головокружительной быстротой.

Вздрагивает громадный участок склона — центральная часть широкой ложбины. Молниеносно пробегают зигзаги трещин. Чудится какое-то неестественное шевеление, и уже мелькают отдельные земляные блоки с нетронутой луговой поверхностью, или кустами, или с уже надающими деревьями, верхушки которых выписывают замысловатые траектории. Следующий миг! Колышущаяся грунтовая масса, клочья трав, ветки и обломки древесных стволов. Еще мгновение! И уже оползает и осыпается мокрая порода по свежим откосам вырванной в склоне хребта как бы дымящейся глубокой ниши. А внизу, непрерывно меняя очертания, несется вал грязевой плазмы, как кара небесная ворвавшийся в зеленую долину.

Критический расход

При анализе взаимодействия водного потока и обломочной породы важное значение приобретает понятие „критический расход“, т. е. расход воды, обеспечивающий сдвиг практически всех элементов ПСМ, включая крупные валуны и глыбы. Исключение возможно лишь для индивидуальных объектов, которые, оставаясь на месте, не в состоянии изменить общую картину массового сдвига верхнего слоя ПСМ.

Критический расход определим, рассмотрев условие сдвига самых крупных камней. Ситуация здесь представляется следующей. Водный поток, поступающий в селевой врез, рывтину или русло, активно размывает обломочные отложения, вовлекая в транспортный процесс мелкозем и щебень и обнажая крупнообломочный каркас ПСМ. Камни и глыбы подмываются и подвергаются воздействию сил: архимедовой и влекущей. От возможности вовлечения их в движение и зависит формирование селя. В противном случае быстро будет создана крупновалуная или глыбовая русловая самоотстойка, т. е. русло „вымостят“ камни определенного размера, сдвиг которых при данном расходе воды невозможен и дальнейшее развитие любого селевого процесса прекратится.



Первый километр долины Никсуэлли. Здесь от ледника того же названия (виден на фотографии) мчались грязекаменные потоки. Новый мост длиной 92 м поднят над руслом на высоту 26 м.



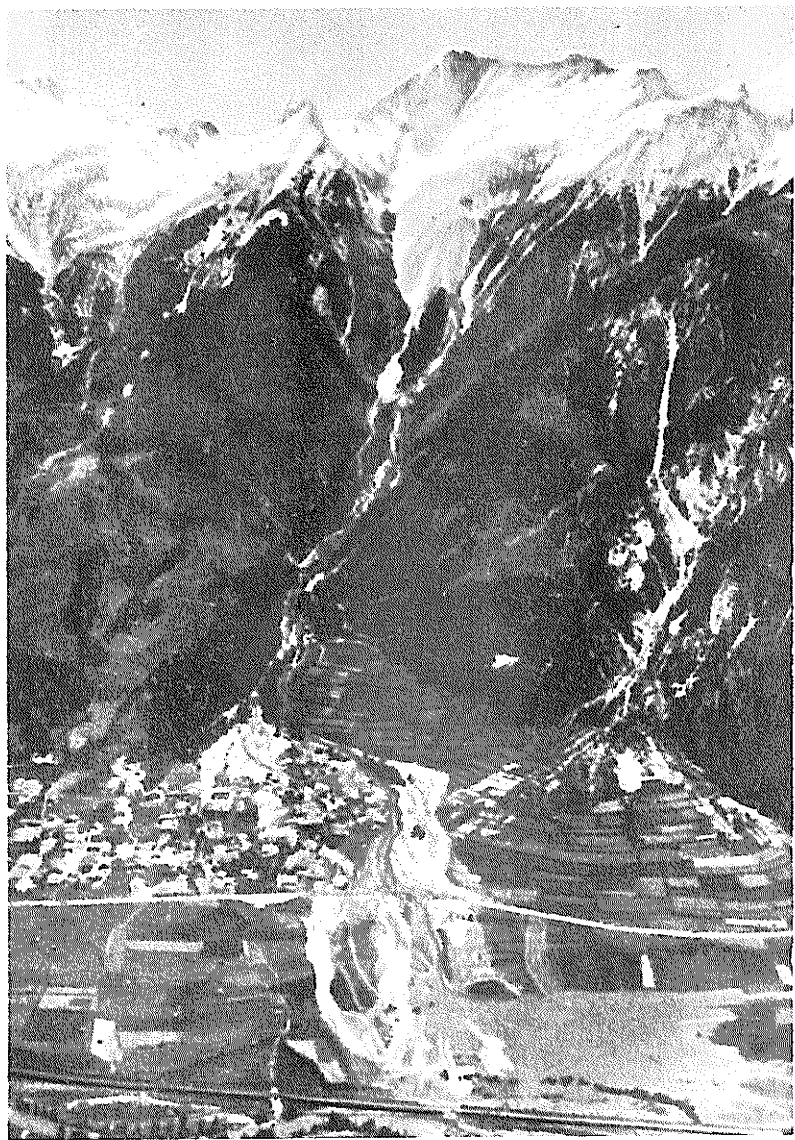
Плотина ледника Медвежьего незадолго до прорыва 1973 г.



Бассейн Малой Алматинки. Язык ледника Туюксу и моренные озера после прорыва. В левом нижнем углу фотографии заметен путь прорывных вод.



Селевые рытвины в ложбинах на скальном массиве. Бассейн реки Няндомы в хребте Джугджур, вытянутом параллельно побережью Охотского моря.



Селевые рытвины в ложбинах на скальном массиве. Бассейн реки Розанна (Тироль, Австрия). Гридлонтобель и поселок Петнёй после селевой катастрофы 29 июня 1965 г.



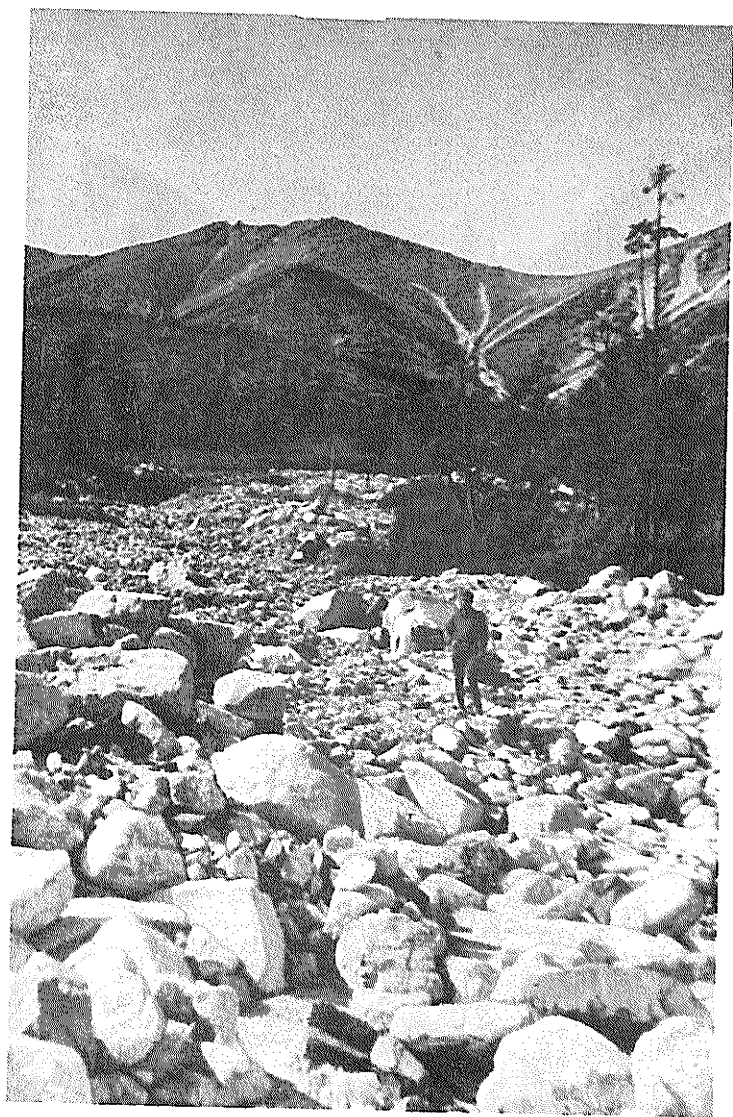
...Красные, желтые или черные осыпи. Бассейн реки Левая Яёлва
на Корякском нагорье.



Селевой врез в толще моренных отложений ниже ледника Чоколит.
Глейшер-Пик, Каскадные горы.



Селевой очаг в бассейне реки Кухтуй. Южные отроги гор Сунтар-Хаята, Дальний Восток.



Селевые выносы в бассейне реки Пестрая. Бассейн реки Иня, южные отроги гор Сунтар-Хаята, Дальний Восток.

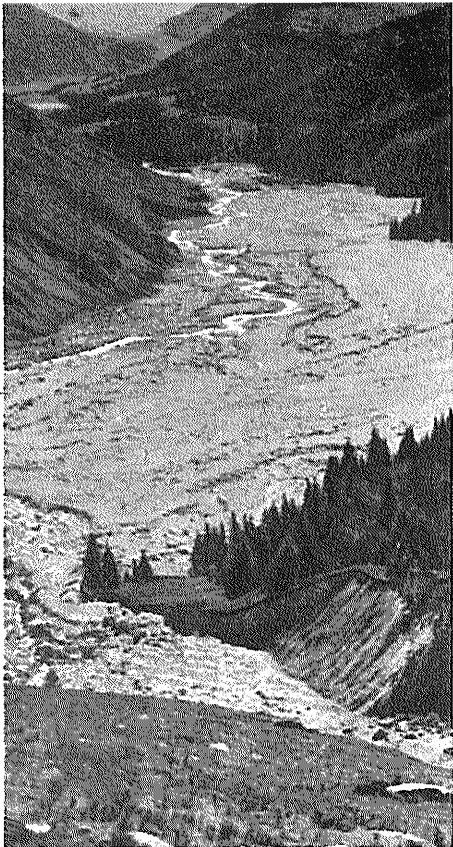


Селевые отложения потока 1973 г.
в бассейне Малой Алматинки, За-
илийский Алатау.

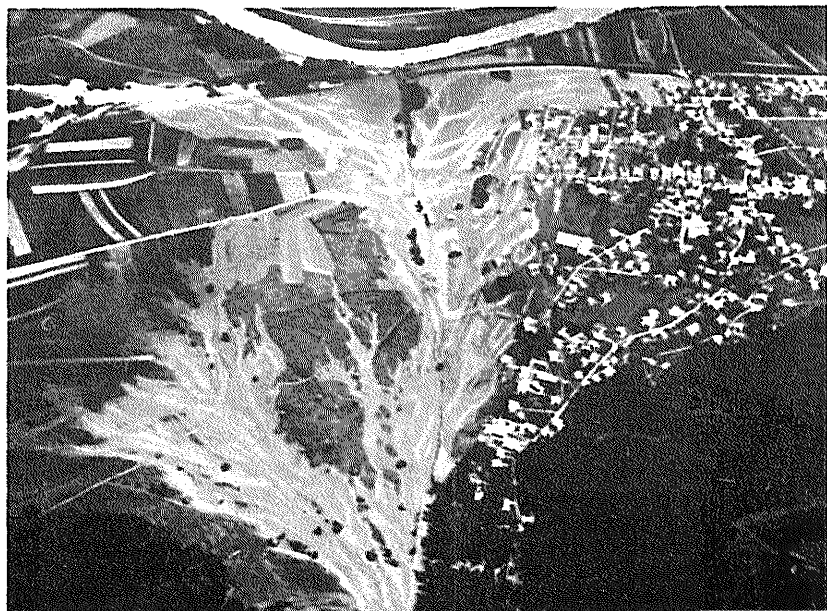


Отложения селевого потока 1977 г.
в долине Большой Алматинки.

Внутригорное селевое поле выноса.
Кызылджар в бассейне реки Чон-
Аксу, впадающей в озеро Иссык-
Куль, Тянь-Шань.



Вид на конус выноса Энтербаха после
селевой катастрофы 26 июля
1969 г. с противоположной стороны.





Грязекаменный поток. Обратите внимание на облака грязевой пыли и неравномерное заполнение потоком русла Чемолган.



Грязекаменный поток. «Голова», Чемолган.



Вход первой волны грязекаменного потока 15 июля 1973 г. в селе-хранилище в урочище Медео.



Грязекаменный поток на поверхности ледника Эллин.



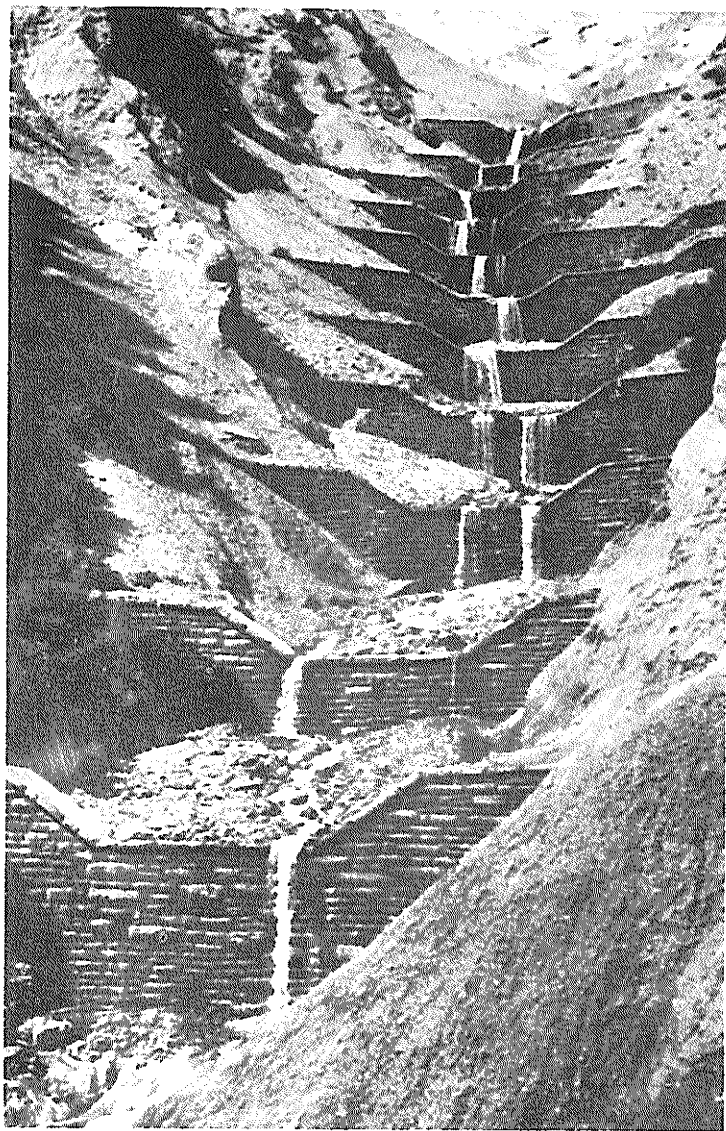
Отложения грязекаменного лахара 30 марта 1956 г. в бассейне реки Сухой Хапицы, район Ключевской группы вулканов, Камчатка. Обратите внимание на погребенный лес, вскрытый водами «сухой речки». На заднем плане хребет Кумроч с вершиной Шиш (2412 м).



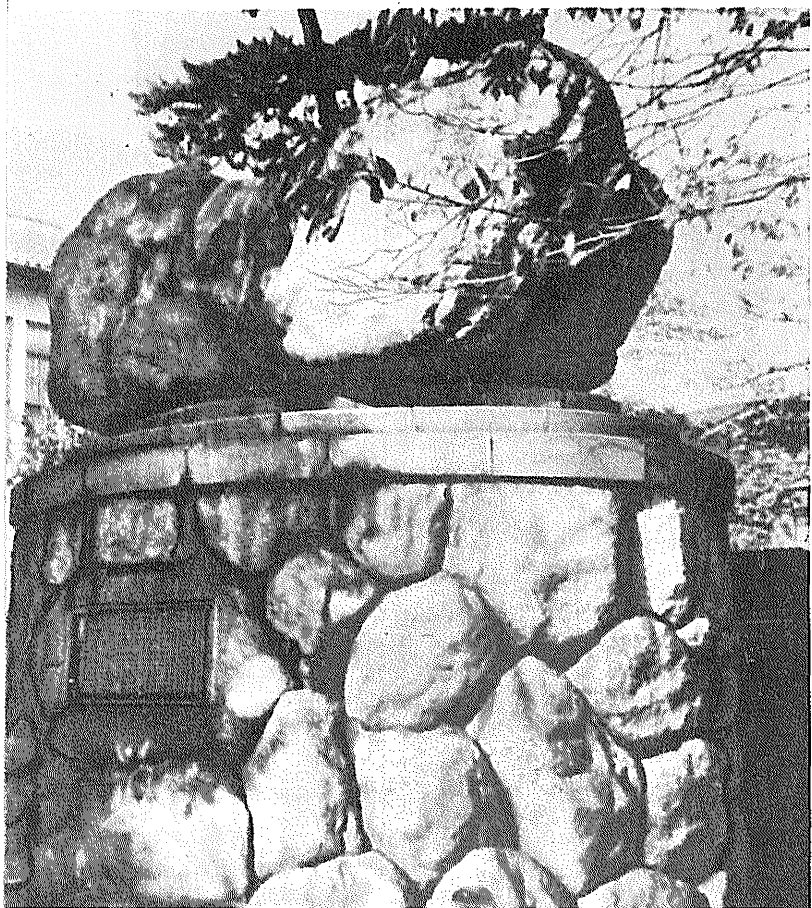
Очаг рассредоточенного селеобразования. Кокчека, бассейн Большой Алматинки, Заилийский Алатау.



Плотина после эксперимента. Чемолган.



Противоселевые барражи. Бреттервандбах близ Матрия, Восточный Тироль, Австрия.



Памятник жертвам селевых потоков в Кобе (Япония). В июле 1938 г. сель, обрушившийся на город, привел к гибели 460 человек и разрушил более 100 тысяч домов. Кобе вновь пострадал от селей в 1961 и 1967 гг.

Водный поток, текущий во врезе, рывине или селевом русле можно разделить на два яруса: нижний, где он рассредоточен и блуждает между камнями, как бы осуществляя турбулентную фильтрацию сквозь валунные нагромождения, и верхний, где он является уже сплошным и свободным.

Условия равновесия камней, на которые воздействует водный поток, в зависимости от уровня последнего определяются соотношениями, имеющими ту же структуру, что и уравнения, соответствующие случаям (3) и (5), но с несколько иной трактовкой входящих в них величин. Вместо h теперь фигурирует d — высота лежащих в русле валунов, ε^* — это „пористость“ валунных нагромождений (относительная площадь русла, свободная от валунов данного и большего размеров), β — относительная (в долях от d) глубина рассредоточенного водного потока (1-й ярус), φ^* — динамический угол трения (уже не внутреннего) мокрой породы о породу. Кроме того, поскольку теперь мы имеем дело только с голыми камнями, которые при обливании их водой практически не становятся тяжелее, член [3] из соотношения (3) выпадает. В результате, если соблюдено условие $\sigma(+) = \sigma(-)$, получим следующие выражения для критических значений β и $\delta = \frac{H}{d}$:

$$\beta_{кр} = \frac{\rho}{\rho_0 \left[1 + \frac{1}{(1 - \varepsilon^*) \left(\frac{\lg \varphi^*}{\lg \alpha} - 1 \right)} \right]},$$

$$\delta_{кр} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \left(\frac{\lg \varphi^*}{\lg \alpha} - 1 \right) (1 - \varepsilon^*) - 1.$$

Для того чтобы заранее знать, какое из этих двух выражений применить в каждом конкретном случае, можно воспользоваться критерием, получаемым из первого уравнения при $\beta = 1$:

$$\xi = \arctg \left[\frac{1 - \varepsilon^*}{\frac{\rho}{\rho - \rho_0} - \varepsilon^*} \lg \varphi^* \right].$$

При $\alpha \geq \xi$ на сцену выводится первое, при $\alpha < \xi$ — второе.

Зная $\beta_{кр}$ или $\delta_{кр}$, нетрудно подсчитать и значение соответствующего им критического расхода. Для этого необходимо иметь представление о соотношении между глубинами и расходами, которое определяется, в первую очередь, скоростью течения. Для простоты примем, что поперечное сечение русла имеет форму прямоугольника. Более сложная форма, скажем параболическая, не меняя существа дела, приводит к более сложным математическим выражениям. Воспользуемся одним из вари-

антов эмпирических (полученных опытным путем) формул для расчета средней скорости течения воды в реке:

$$\bar{v} = k_1 H^{0,67} \sin^{0,17} \alpha.$$

Здесь k_1 — коэффициент, обратный, как говорят гидрологи и гидравлики, шероховатости русла, т. е. тем меньший, чем сильнее русло со своими валунами, сужениями и расширениями, извилинами, водопадами и вторгающимися в воду деревьями и кустами оказывает сопротивление течению. В результате выражения для критического расхода приобретают вид:

$$Q_{кр} = k B \varepsilon^* (\beta_{кр} d)^{1,67} \sin^{0,17} \alpha,$$

$$Q_{кр} = k B d^{1,67} (\varepsilon^* + \delta_{кр}^{1,67}) \sin^{0,17} \alpha.$$

Все обозначения здесь знакомы, за исключением величины B , которая представляет собой ширину прямоугольного русла. Первое уравнение отвечает случаю „малой воды“, когда вершины валунов еще торчат из нее, второе же соответствует полному затоплению всех русловых образований.

Транспортно-сдвиговой селевой процесс

$$\boxed{\alpha > \alpha_2}$$

$$\boxed{Q > Q_{кр}}$$

Водный поток устремляется в крутое и узкое ущелье, заполненное рыхлообломочной горной породой. Последствия этого всегда бывают ужасающими. Расход многократно возрастает, плотность потока увеличивается — и грязекаменная лавина, обладающая невероятной подвижностью и страшной энергией, сформирована. Как это происходит? Почему расход потока может возрасти в 10 раз и более?

Вспомним учебник физики, определения таких понятий, как кинетическая и потенциальная энергия, работа, мощность. Назовем элементарной мощностью (n) работу, совершаемую силой на единице пути за единицу времени, а элементарной потенциальной мощностью ($\tilde{n}$) — способность произвести работу на единице пути за единицу времени. Обе величины имеют размерность Ватт на метр, или Ньютон в секунду. Для селевого потока

$$\tilde{n} = \gamma Q_c \sin \alpha,$$

где γ — плотность и Q_c — расход.

В силу отсутствия экспериментальных данных и неразработанности механики среды, подобной ПСМ или селевой массе (см. этюд II), мы вынуждены пользоваться самыми общими соображениями, стараясь поставить теоретические рамки для такого необузданного процесса, каким является транспортно-сдвиговой селевой процесс. Сделаем самые общие предположения, которые могут нам подсказать здравый смысл и относительное понимание сущности явления: приращение расхода

твёрдого материала (G), вовлекаемого в селевой поток по мере его продвижения вдоль ПСМ, обратно пропорционально коэффициенту устойчивости ПСМ (т. е. отношению $\operatorname{tg} \varphi / \operatorname{tg} \alpha$) и прямо пропорционально коэффициенту текучести селевой массы (R , см. этюд 11) и элементарной потенциальной мощности потока при условии, что последняя превышает некоторое критическое значение. В компактной математической записи это выглядит так:

$$\frac{dG}{dl} = c_1 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \varphi} \tilde{n} R \quad \text{при } \tilde{n} > n_{\text{кр}}.$$

Разного рода манипуляции с величинами, среди которых в конечном счёте фигурируют: g — скорость свободного падения, α — угол наклона ПСМ, ρ_0 и ρ — соответственно плотность воды и породы, ε — пористость и ξ — относительная объёмная влажность ПСМ (отношение объёма воды к объёму твёрдого вещества), $\xi_{\text{нт}}$ — та же относительная влажность, но на пределе текучести, Q — расход воды, поступившей в очаг, l — длина участка ПСМ, приводят к следующим выражениям для твёрдого и селевого расходов (при $Q > Q_{\text{кр}}$):

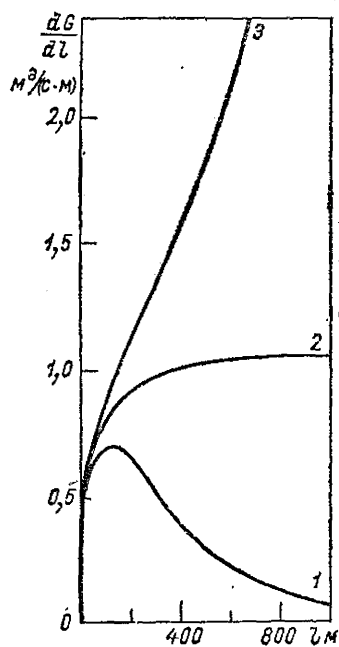
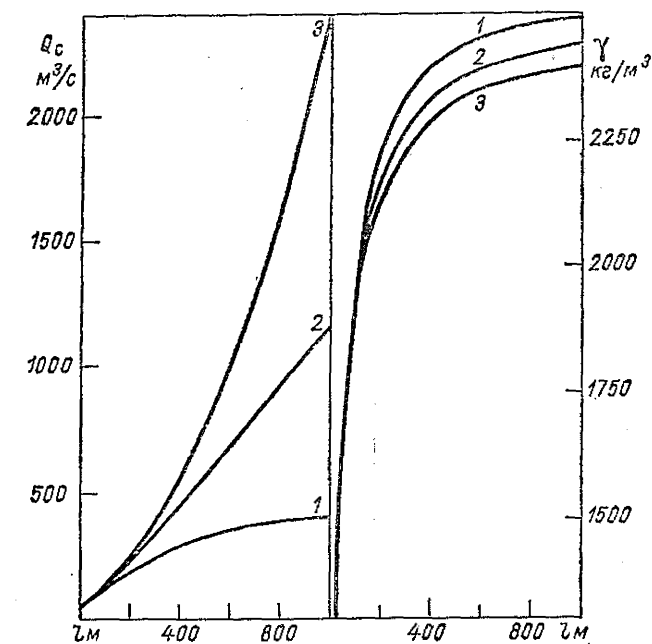
$$G = NQ,$$

$$Q_c = [1 + (1 + \xi) N] Q,$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho - \rho_0}{\xi \rho_0 + \rho} \ln \left[1 + \left(\xi + \frac{\rho}{\rho_0} \right) N \right] + \frac{1 + \xi_{\text{нт}}}{\xi - \xi_{\text{нт}}} \ln \left[1 + (\xi - \xi_{\text{нт}}) N \right] = \\ = c_1 q l (\rho + \rho_0 \xi_{\text{нт}}) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \varphi} \sin \alpha. \end{aligned}$$

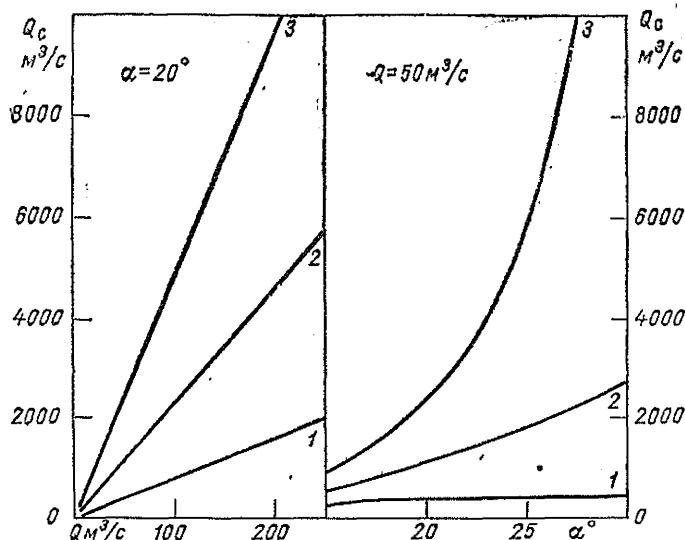
Сущность транспортно-сдвигового селевого процесса, приписываемая ему предложенной моделью, ощутимо воспринимается при осмысливании конкретной, но несколько идеализированной ситуации, описанной ниже.

Водный поток расходом $50 \text{ м}^3/\text{с}$ поступает в селевой очаг, имеющий 20-градусный уклон и 1000-метровую длину. У ПСМ в очаге следующие характеристики: плотность вещества породы $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, пористость $\varepsilon = 0,167$, относительная объёмная влажность на пределе текучести $\xi_{\text{нт}} = 0,133$, угол внутреннего трения $\varphi = 35^\circ$. Дальнейшая судьба водного потока, попавшего в селевой очаг, в сильнейшей мере зависит от влажности ПСМ. Проследим ход событий для трех граничных вариантов: при абсолютно сухом ПСМ ($\xi_1 = 0$), увлажненном до предела текучести ($\xi_2 = 0,133$) и заполненном водой ($\xi_3 = 0,200$). Будем их дальше называть случаями 1, 2, и 3 соответственно. Предлагаю обратить внимание на три графика. Первый отражает рост расхода грязекаменной массы по длине очага, второй — увеличение ее плотности и третий — изменение интенсивности захвата породы, т. е. приращение твёрдого расхода на единицу длины ПСМ. Случай 1 отвечает постепенному затуханию, 2 — стабильности и 3 — лавнообразному раз-



Расход, плотность селевой массы и приращение расхода твердого вещества на метр пути по длине однородного селевого очага.

витию процесса, которое может ограничить только резкое уменьшение уклона или просто отсутствие ПСМ. Что касается графика изменения плотности селевой массы по длине очага, то пределом роста этой плотности в случаях 1 и 2 являются плотность селевой массы на пределе текучести (2500 кг/м^3), а в случае 3 — плотность влажного ПСМ в перемешанном состоянии (2417 кг/м^3). Вид кривой $dG/dl=f(l)$ при



Расход селевого потока в конце 1000-метрового однородного селевого очага в зависимости от начального расхода воды и уклона.

слабом увлажнении ПСМ получил подтверждение на материалах экспериментов по искусственному воспроизведению селевых потоков на Чемолганском полигоне.

Модель характеризуют также два других графика, показывающих зависимость расхода селевого потока в конце 1000-метрового участка от расхода исходного водного потока и от уклона ПСМ. И здесь на первое место выступает степень увлажнения ПСМ. Особенно впечатляюще совместное влияние влажности и уклона.

Какова картина рождения селевого потока при проявлении транспортно-сдвигового процесса? Водный поток устремляется в крутое и узкое ущелье... Он мгновенно мутнеет. Вот уже подхвачены песок, гравий и мелкие камни, зашевелились более крупные. Поверхность ПСМ, залитая водой, оживает. Смесь воды и мелких обломков породы бурлит и клокочет, повсюду вскипают и опадают буруны, слышны глухие удары, скрежет,

всплески. Валуну вздрагивают и сдвигаются, одни из них, содрогаюсь, скользят, другие опрокидываются, перекачиваются.

В целом создается впечатление, что камни и глыбы как бы пытаются проявить свою индивидуальность, устранившись от общего стремления влиться в массовое перемещение. Но это длится недолго, и весь валунно-глыбовый ансамбль сливается в едином движении. Чем дальше вниз по очагу продвигается фронт селевого потока, тем он круче, выше и объединяет возле себя все более крупных представителей глыбового контингента.

Вот фронт потока покидает очаг, но мы за ним не последуем, а взглянем, что творится в очаге. Вода продолжает вливаться в него по-прежнему, а с подрезанных потоком склонов оползают и обваливаются камни и блоки породы. И что интересно: уровень грязекаменного потока начинает постепенно падать, несмотря на то что его расход остается тем же или даже увеличивается. Поток погружается в ПСМ! Он зарывается в толщу обломочной породы, вовлекая в движение все более глубокие ее слои. Поэтому, когда поступление воды заканчивается и селевой процесс затухает, на дне ущелья остается зияющая рывина, выработанная в толще ПСМ при формировании грязекаменного селя. Дно этой свежей рывины по сравнению с исходной поверхностью ПСМ опущено на много метров вниз. Но ни в коем случае нельзя утверждать, что такой могла быть глубина потока.

Транспортно-сдвиговый селевой процесс естественным образом занимает полагающееся ему место на иерархической лестнице, в основу построения которой положено соотношение степени активности воды и горной породы в селеобразовании. Теперь больше не вызывает сомнений факт формирования селевых потоков высокой плотности (более 2000 кг/м^3) при взаимодействии водных потоков с рыхлообломочной породой в селевых очагах. Сейчас это очевидно, но до первого эксперимента по воспроизведению в естественных условиях искусственного селевого потока, который состоялся 27 августа 1972 г. (см. этюд 16), и прохождения селя 15 августа 1973 г. на Малой Алматинке под Алма-Атой основная масса специалистов исповедовала паводковую концепцию природы селевых потоков, делая исключение только для таких, как считалось, специфических объектов, какими являются Дуруджи и Кишчай. Считалось, вообще-то вопреки множеству фактов и скорее всего в силу традиционности взглядов, что сели представляют собой ливневые паводки, переносящие большое количество взвешенных и влекомых наносов за счет своей транспортирующей способности, и что их плотность колеблется от 1100 до 1700 кг/м^3 . Отрицательно относясь к концепции превращения почти всех селевых потоков в наносоводные, я, как это часто бывает, сделал крен в другую сторону и ожидал при эксперименте проявления сдвигового процесса, полагая, что только он ответствен за формирование грязекаменных потоков высокой плотности. Поэтому результаты эксперимента, во время которого перед

нами во всем своем великолепии предстал и продемонстрировал свои возможности именно транспортно-сдвиговый селевой процесс, во многом оказались неожиданными не только для моих идеологических противников, но и для меня самого и моих сторонников. Нынешнее понимание сущности селевого процесса, промежуточного между транспортным и сдвиговым, это — замечательный подарок, преподнесенный природой нам, организаторам и участникам эксперимента.

Транспортный селевой процесс

$$\alpha < \alpha_c$$

$$Q > Q_{кр}$$

Ливневые паводки, время от времени проносющиеся по горным водотокам, и наносоводные сели — кровные родственники. Более того, каждый паводок, если он по своим размерам переходит определенную границу, связанную с его способностью сорвать русловую крупновалунную самоотмостку и тем самым привести в массовое движение обломочный материал, слагающий русловое ложе, становится селевым. Такая формулировка перехода от водного потока к селевому принадлежит ереванскому гидравлику И. В. Егназарову. Она была высказана на 10-й Всесоюзной селевой конференции в г. Ереване и явилась большим моральным облегчением для селевиков и гидрологов, которые до этого стыдливо предпочитали не заострять внимания на этом вопросе. Не следует думать, что предложение Егназарова не было встречено в штыки. Возражений, и, конечно, убедительнейших, было невероятно много, но прошло время, и они забылись. А логика понимания взаимоотношения двух родственных явлений осталась.

Правда, была и альтернатива. М. С. Гагошидзе из Грузинского научно-исследовательского института гидротехники и мелiorации предлагал наносоводные потоки объявить... неселями. Грязекаменный поток, да еще с определенным количеством глины, вот это — сель. Все же остальное к селевым потокам просто не имеет отношения, и пусть им занимается кто угодно, только не селевики. Но ведь слова „сель“ или „силь“ горные жители всегда использовали в первую очередь для обозначения именно наносоводных потоков. И было бы несправедливо лишить их пользоваться такой возможностью и впредь.

Возникновение наносоводного селя складывается из двух последовательных этапов. Сначала на поверхности горных склонов формируется ливневый сток (см. этюд 5) и происходит эрозионный смыл, а затем, после попадания стекающей суспензии в русловую сеть, начинается собственно транспортный селевой процесс, т. е. процесс взаимодействия потока воды или суспензии с русловыми обломочными накоплениями.

Рассмотрим бассейновый и русловой этапы формирования наносоводного селевого потока. Первый из них ничем не отли-

чается от формирования дождевого стока вообще, разве только в нашем случае мы исключим из сферы внимания поверхности со слабыми стокообразующими возможностями. Настоящие селевые водосборы — это обнаженные поверхности со смытой почвой и тшедушной растительностью, покрытые сетью борозд, от мельчайших, плывя в которых даже опилки почувствовали бы себя стесненно, до глубоких промоин, в которые можно погрузиться по пояс. Густота склоновой микроручейковой сети может быть очень значительной — на 1 м² суммарная длина микрорусел может достигать 5—10 м.

В природе соблюдается четкое правило: если на склонах время от времени возникает поверхностный сток, то тем самым создаются условия для быстрого и беспрепятственного его сбрасывания в русловую сеть. Иными словами, существует тесная связь между возможностями образования стока и стекания дождевой воды. Взаимосвязь между этими двумя сторонами одного явления осуществляет эрозионный процесс, т. е. процесс смыва почвы и мелкоземной породы под воздействием капель дождя, стекающих, сливающихся и рассредоточивающихся струек, шумных и ленистых склоновых потоков. Поэтому мутность ливневых вод сильно зависит от интенсивности дождя. Крупнейшим знатоком гидрологии Средней Азии В. Л. Шульцем в свое время при анализе твердого стока лаводков, случавшихся на Каттасае у поселка Уратюбе, был отмечен, казалось бы, парадоксальный факт более высокой мутности при меньших расходах, и наоборот. Этот факт легко находит объяснение в том, что за взвешенные наносы в первую очередь несут ответственность эродируемая поверхность водосбора и ливень, а затем уже русло и текущий в нем поток. Паводки с одинаковым максимальным расходом может сформировать как короткий, но сильный ливень, так и продолжительный, но умеренной интенсивности дождь. В первом случае мутность водотока будет всегда существенно выше.

Предположим, что интенсивность поступления твердого материала в русловую сеть в результате эрозионного смыва пропорциональна интенсивности поверхностного стокообразования (см. этуод 5) и уклону склона или микроводосбора. Тогда с учетом дополнительного поступления воды, содержащейся в размываемой почве, интенсивность формирования суспензии можно определить выражением

$$q_c = q + \kappa \sin \alpha (1 + \xi) q \text{ при } q > q_0,$$

а ее плотность — уравнением

$$\gamma_0 = \frac{\kappa \sin \alpha q (\rho + \rho_0 \xi) + \rho_0 q}{\kappa \sin \alpha q (1 + \xi) + q},$$

где q_0 — интенсивность стокообразования, при которой начинается заметный смыв. Параметр κ , присутствующий в обоих выражениях, является обобщенным показателем степени по-

датливости размыву данного типа земной поверхности. Именно к наряду с влажностью почвы (а при выпадении дождя она приблизительно постоянна) определяет величину максимально возможной плотности суспензии

$$\gamma_{\max} = \frac{\kappa \sin \alpha (\rho + \rho_0 \xi) + \rho_0}{\kappa \sin \alpha (1 + \xi) + 1}.$$

В своем предельном развитии эрозонное расчленение на податливых размыву грунтах создает особый тип рельефа, получивший в геоморфологии (наука о земном рельефе) название — бедленд, т. е. дурные земли. Подбирая в мае 1978 г. подходящий объект для изучения формирования наносоводных селей среди так называемых адыров Ферганской долины, мы остановились на совершенно великолепном бассейне, мутные селевые воды которого во время ливней вливаются справа в реку Гавасай, в том месте, где она пересекает полосу Чуст-Палских адыров (по названию населенных пунктов Чуст и Пал), сильно расчлененных асимметричных увалов, сложенных конгломератами и суглинками и поднимающихся над днищами окружающих долин всего на 100—150 м. Выбранный селевой бассейн площадью несколько квадратных километров лежит в местности, носящей черты бедленда. Исчерченные дендровидными узорами микроручейковой сети глинистые склоны, лишённые растительности, если не обращать внимания на отдельные былинки и какие-то явно здесь неуместные крошечные, чахлые, колючие и незаметные деревянистые образования, окружают ветвящийся русловой лабиринт. Вместе с острыми водораздельными гребнями, иногда затупленными (через адыр перегоняют стада баранов), и округлыми останцами на стыках гребней они создают какой-то фантастический пространственный барельеф, орнамент, гигантскую мозаику, как бы сложенную из множества серо-желтых плит различной освещенности в какой-то целеустремленной системе, в которой присутствуют одновременно и хаос, и упорядоченность.

Во время ливня такой адыр непроходим. Отовсюду низвергаются потоки дождевой воды, перегруженные наносами, кое-где сползают грязевые микропотоки, способные продвинуться только до ближайшего русла, где их самих тут же размывает, а их материал унесет наносоводный сел. Единый шумовой фон составляют шелест дождя, какое-то бульканье, журчание, грохот малых и больших потоков.

Очень похожа на описанные адыры полоса оголенных склонов, вытянувшихся по предгорьям Терской-Алатау вдоль южного берега озера Иссык-Куль. Здесь, правда, нет столь жестокого бедленда, но повсеместны проявления глинистого карста. Бешеные ливневые потоки через многочисленные воронки и колодцы исчезают в толще лёссовидных суглинков, чтобы, промчавшись по подземным галереям и туннелям, вновь излиться в русло через какое-нибудь отверстие или щель. Некоторые

многометровые колодцы с долго сохраняющейся на их дне водой даже опасны для неосторожного путника.

Но вот склоновые мутные ручьи наконец объединяются в единый мощный поток, который взламывает русловую самоотмостку и приступает к массовой транспортировке гальки и валунов.

Транспортирование влекомых наносов — это движение обломочной породы по дну за счет энергетических затрат потока воды или, точнее, суспензии. Элементарная мощность, которую следует затратить на передвижение объема твердого материала в единицу времени, определяется таким уравнением:

$$n = gG(\rho - \gamma_0) \operatorname{tg} \varphi^* \cos \alpha,$$

а элементарная потенциальная мощность потока суспензии, т. е. все то, чем этот поток обладает в энергетическом плане, — уравнением

$$\tilde{n} = g \gamma_0 Q \sin \alpha.$$

Если предположить, что на поддержание этого движения расходуется определенная и постоянная часть c_2 элементарной потенциальной мощности потока суспензии, то выражение для расхода влекомых наносов при развитом транспортном селевом процессе будет таким:

$$G = c_2 \frac{\gamma_0}{\rho - \gamma_0} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \varphi^*} Q \text{ при } Q \geq Q_{\text{кр}}.$$

10. СЕЛЕВЫЕ ОЧАГИ

Вершины гор — естественный нарост
Вокруг ложбин, ущелий и борозд.

Иоганн Вольфганг Гете. Фауст
(пер. Б. Пастернака)

Вот так поход — рекомендую!
Что за фантазия пришла
Тебе забраться в глушь такую,
Где на скале торчит скала?
Иль непременно место выбрать надо,
Когда-то прежде бывшее дном ада?

Иоганн Вольфганг Гете. Фауст
(пер. Н. А. Холодковского)

Грязекаменные потоки образуются лишь в особых условиях. Участки горных речных бассейнов, где такие условия имеют место, называют селевыми очагами. Очаги исключительно раз-

нообразны, но их все объединяет и нечто общее. В силу этой общности определим селевой очаг как ложбину, которая служит местом накопления рыхлой обломочной породы, способна концентрировать сток и имеет достаточный уклон для развития сдвигового или транспортно-сдвигового селевых процессов и тем самым для формирования грязевого или грязекаменного потока высокой плотности.

Скопление обломочной породы, потенциально представляющее собой основную часть массы будущего селевого потока, получило логичное наименование — потенциальный селевой массив, или сокращенно ПСМ.

Селевые очаги делят на два генетических типа, соответствующих возможностям развития в них сдвигового или транспортно-сдвигового селевого процесса: очаги обводнения и очаги взаимодействия.

По ландшафтными признаками селевые очаги условно можно подразделить на две группы: потенциальные (без видимых следов селевой деятельности) и действующие, на которые периодическое или недавнее зарождение селей наложило несомненный отпечаток. Вчерашний потенциальный очаг сегодня может стать действующим.

Ландшафтные типы очагов объединяют в себе все упомянутое выше многообразие элементов рельефа и гидрографии. К потенциальным селевым очагам относятся ложбины залесенные, задернованные, с осыпными склонами, в скальных и полускальных массивах, на уступах морен, заболоченные, к действующим — обнажения, врезы, рытвины. Можно себе представить любые сочетания потенциальных и действующих селевых очагов, т. е. превращения первых во вторые. Таким образом, полное наименование ландшафтного типа действующих селевых очагов строится по примеру следующих: „рытвина в залесенной ложбине“ или „врез на уступе морены“.

Селевые обнажения, врезы и рытвины — это новообразования, явившиеся следствием селевых процессов и отличающиеся друг от друга морфометрической формулой $M\Phi = H_m/B * L/B$, где H_m , B и L — соответственно максимальная глубина в профиле поперечного сечения, ширина и длина образования. Для обнажений $M\Phi = 0,01 \div 0,06 * 1 \div 15$, для врез $M\Phi = 0,4 \div 0,8 * 1 \div 15$, для рытвин $M\Phi = 0,4 \div 0,8 * 15 \div 100$ и более.

Несколько особняком стоят очаги рассредоточенного селеобразования. Это крутые обнажения легко разрушаемых пород с густой сетью больших и малых борозд, быстро заполняющихся твердым материалом в межселевые промежутки времени. Возможности накопления здесь ограничены, а скорость разрушения породы по мере заполнения борозд быстро уменьшается.

Селевые потоки, сформированные в очагах рассредоточенного селеобразования, сравнительно маломощны и могут повторяться на одном и том же объекте несколько раз в году. Методика их расчета в некотором роде подобна той, которая

была описана при рассмотрении эрозионного смыва на поверхности горных склонов, только основной параметр λ для очагов рассредоточенного селеобразования увеличивается более чем в 10 раз.

Чем очаги рассредоточенного селеобразования отличаются от других селевых очагов обводнения, которые можно объединить под названием локальных? Закономерности развития сдвигового селевого процесса в очагах обоих типов одинаковы. И здесь и там селеформирование определяется сдвигом и последующим массовым движением рыхлообломочной породы. Различие между очагами скорее количественное, но здесь мы встречаемся именно с той ситуацией, в которой количественные моменты приводят к иному качественному подходу. В одном случае мы можем позволить себе рассматривать ПСМ как индивидуальный объект, в другом — приходится говорить о площади, в пределах которой находится очень большое количество локальных микроочагов.

От селевого очага неотделим его ПСМ. В свойствах обломочной породы, слагающей ПСМ, уже во многом заложены особенности поведения будущего грязекаменного потока. Все, что сказано о способах количественного описания селевой массы (см. этюд 11), в полной мере относится и к ПСМ, с тем лишь уточнением, что $p(-1) + p(0)$ в фазовой и $f(-1) + f(0)$ в фазово-гранулометрической матрицах равны пористости ПСМ, а $p(0)$ и $f(0)$ определяют его объемную влажность. Не следует думать, что гранулометрические матрицы ПСМ и селевой массы полностью идентичны. В процессе движения селя состав его изменяется. В первую очередь поток стремится потерять крупные камни. Затем в потоке, так как он непрерывно работает, подобно гигантской шаровой мельнице, растет содержание глинисто-пылеватых фракций. Этот рост не может компенсировать даже обратный процесс — распыление глинистых частиц в виде грязевого аэрозольного облака, оседающего на скалах и растительности.

В. Н. Вардугин на многочисленных примерах продемонстрировал тенденции изменения гранулометрического состава мелкозема при его перемещении из ПСМ на конус выноса. Он констатировал факт измельчения мелкозема и установил, что в селевой массе по сравнению с ПСМ глинисто-пылеватые фракции увеличиваются тем существеннее, чем турбулентнее поток и чем большее расстояние он прошел. Это явление не следует смешивать с сортировкой наносов водным потоком, хотя на первый взгляд они имеют некоторое внешнее сходство.

Разница в гранулометрическом составе мелкозема ПСМ и селевой массы видна на двух примерах (1 — Чемолган, 1973 г., состояние потока бурное и сверхбурное, режим движения турбулентный, расстояние, пройденное потоком после выхода из очага, 0,3 км; 2 — Дуруджи, 1963 г., состояние потока спокойное, режим движения преимущественно ламинарный, пройденное расстояние 14 км).

мм —0,001 —0,001 —0,01 —0,1

Чемолган

ПСМ	0,01	0,02	0,17	0,8
Поток	0,02	0,12	0,43	0,43

Дуруджи

ПСМ	0,07	0,2	0,31	0,42
Поток	0,07	0,25	0,38	0,3

Нет на Земле более расчлененной и истерзанной местности, чем местность в активно действующих селевых очагах.

В Варшаве летом 1971 г. в период работы Международного симпозиума по применению математических моделей в гидрологии мне довелось увидеть очень своеобразный короткометражный фильм-этнод. Названия я не помню, а скорее всего не знал его и тогда. Содержание фильма таково. Молодой человек с барабаном через плечо преодолевает крутой склон... в типичном очаге рассредоточенного селеобразования. Путь его пересекают гряды и рытвины, из-под ног осыпаются камни и щебень. Барабан падает, гремя несется вниз. Человек возвращается за ним и снова рвется наверх. Почти весь фильм посвящен этому подъему. Наконец вершина. Победный барабанный бой оглашает окрестности. Человек садится на барабан и опускает лицо на руки. Вдруг из-за гребней и гряд селевого очага появляются мужчины и женщины со стульями в руках. Они составляют их рядами и садятся перед человеком на барабане. И он поднимает голову, и все видят его лицо, лицо глубокого старца. И я подумал, что действительно, работать в селевых очагах — большой и опасный труд, а на познание такой стихии, как сель, не хватит одной человеческой жизни.

Наблюдателю, находящемуся в настоящем селевом очаге, открывается грандиозное зрелище. Ландшафт представляется зловещим, искалеченным, инопланетным. Это вздымающиеся утесы, зазубренные гребни, обрывы, шрамы и язвы на склонах, нависающие глыбы, в любой момент готовые сорваться вниз, серые, белые, красные, желтые или черные осыпи, обратившиеся в руины готические замки, крепостные стены и башни. Ночью это — место, откуда ближе до звезд, где несущиеся камни вычерчивают на скалах свой огненный след, где грохот обвала будит гулкое эхо, и тогда кажется, что громоподобно звучит само пространство. А когда все стихнет и вершины гор вновь соприкоснутся с космосом, то очаг снова оцепенеет... В этом оцепенении таится угроза. Селевой очаг ждет своего часа, когда все вокруг будет разбужено, и неживой мир воды и камня содрогнется и напомнит о себе человеку.

11. СЕЛЕВАЯ МАССА

Как известно, грязь — это материя, которая находится не там, где ей подобает быть.

Франц Фюжан. Двадцать два дня, или половина жизни

Соотношение количества твердого и жидкого вещества в потоке — главное и определяющее его свойство. В зависимости от характера распределения частиц по размеру это его главное свойство может приобретать те или иные оттенки и особенности. Попытки классифицировать селевые потоки, предпринятые в свое время, в первую очередь связывались именно с насыщенностью их твердым материалом.

В самом общем виде следует различать три фазы селевой массы: твердую, жидкую и газообразную. Практически достаточно рассматривать только две первые из них, так как аэрация (насыщение воздухом) массы — явление, если и возможное, то вряд ли обычно имеющее существенное значение. Соотношение фаз удобно записывать в форме матрицы-столбца:

$$\| \Phi \| = \left\| \begin{matrix} p(-1) \\ p(0) \\ p(1) \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} 0,01 \\ 0,20 \\ 0,79 \end{matrix} \right\|.$$

Сумма элементов матрицы всегда равна единице. Говоря об относительном содержании той или иной фазы, подразумевают только доли объема. Поэтому данную матрицу, назовем ее фазовой, следует понимать так, что селевая масса по объему состоит из одной части воздуха, 20 частей воды и 79 частей твердого вещества.

Твердая фаза селевой массы представляет собой так называемый дисперсонд, сложенный частицами и обломками горной породы самой различной величины. Диаметр крупнейших включений может превышать размер мельчайших частиц в 10^{10} раз, что приблизительно соответствует соотношению между размерами земного шара и дробинки. В такой ситуации кривая распределения частиц по размерам или соответствующая ей гранулометрическая матрица

$$\| \Gamma \| = \left\| \begin{matrix} g(1) \\ g(2) \\ \dots \\ g(9) \end{matrix} \right\|$$

приобретают важнейшее значение. Элементы гранулометрической матрицы расшифрованы в следующей таблице.

№ эле- мента	Размер частиц		Условное словесное наименование
	мм	м	
1	< 0,001	< 10 ⁻⁶	Коллоиды, глина
2	0,001—0,01	10 ⁻⁶ —10 ⁻⁵	Глина
3	0,01—0,1	10 ⁻⁵ —10 ⁻⁴	Пыль
4	0,1—1	10 ⁻⁴ —10 ⁻³	Песок
5	1—10	10 ⁻³ —10 ⁻²	Гравий, дресва
6	10—100	10 ⁻² —10 ⁻¹	Галька, щебень
7	100—1000	10 ⁻¹ —1	Валуны, камни
8	1000—10000	1—10	Глыбы
9	> 10000	> 10	Индивидуальные объекты

Фазовая и гранулометрическая матрицы могут быть объединены в фазово-гранулометрическую:

$$||\Phi\Gamma|| = \begin{vmatrix} f(-1) \\ f(0) \\ f(1) \\ \dots \\ f(9) \end{vmatrix}.$$

В качестве примера приведу осредненную фазово-гранулометрическую матрицу селевой массы, имеющей плотность 2300 кг/м³ и типичной для селей Малой Алматинки:

$$||\Phi\Gamma|| = \begin{vmatrix} 0, \\ 0,210 \\ 0,002 \\ 0,010 \\ 0,033 \\ 0,040 \\ 0,148 \\ 0,235 \\ 0,227 \\ 0,083 \\ 0,012 \end{vmatrix}.$$

А вот для знаменитых потоков, зарождающихся в глинисто-сланцевых селевых очагах южного склона восточной части Главного Кавказского хребта (Дуруджи, Шинчай, Кишчай), характерно, что $f(1) > 0,015$, $f(1-4) > 0,200$ и $f(9) = 0$.

Информацию о составе селевой массы (это относится также и к ПСМ) целесообразно сосредоточить в таких стандартизированных матрицах. Применение всякого рода осредненных показателей, например среднего диаметра частиц, обедняет эту

информацию и приводит к неоднозначности выводов и решений и недопустимой неточности инженерных расчетов. Я, может быть, и не стал бы заострять на этом внимание, если бы проникновение в расчетные методы именно осредненных показателей не приняло прямо-таки угрожающий характер. Действительно, средний диаметр валунов, размеры которых в каком-нибудь их скоплении келеблются, скажем, от 0,5 до 1,5 м, является великолепной характеристикой. Ну а что вы скажете о среднем значении чисел, отличающихся друг от друга в 10 миллионов раз? И это по диаметру. А по объему это отношение выражается цифрой, столь головокружительной, что о ней даже не хочется говорить.

Матрицы можно подразделить на основные, или информационные, и вспомогательные, или операционные. Пользуясь некоторыми простейшими правилами, информационные матрицы с помощью операционных можно пересчитать в интересующие нас конкретные показатели. В принципе операции с такими матрицами дают возможность определить любые параметры математических моделей, описывающих поведение селевой массы. К информационным матрицам наряду со знакомыми относятся минералогические, а операционные включают в себя матрицы связанной влаги, показателей внутреннего трения, плотности минералов и фазово-гранулометрических элементов.

Обломки горной породы 5—9 гранулометрических диапазонов составляют крупнообломочную часть селевой массы. В принципе возможно самостоятельное течение такого материала даже в сухом состоянии. В природе такие обломочные потоки возникают при течении песка на склонах дюн и барханов, осыпании горной породы по скальным кулуарам, дроблении скальных массивов при обвалах. При движении обломочного потока поддерживается приблизительно постоянная его пористость, которая называется динамической. Последняя зависит от гранулометрического состава осыпающейся породы.

Физико-механические свойства селевой массы в слабой мере зависят от вида горной породы, которая присутствует среди крупных включений, так как валуны, галька и гравий, состоят ли они из известняка, гранита или другой распространенной породы, ведут себя приблизительно одинаково. Примером отклонения от правила может быть прочный и шероховатый песчаник, имеющий в обломочной массе повышенное внутреннее трение, а с обратными свойствами — глинистый сланец, особое поведение которого усугубляется плоской формой его обломков.

Граница между мелкоземной и крупнообломочной составляющими селевой массы условно принята равной 1 мм. Обычно такая условность не создает каких-либо затруднений. Мелкие обломки пограничных гранулометрических диапазонов (4 и 5-й) в принципе способны сформировать селевой поток и без участия частиц размером менее 0,1 мм. Я имею в виду разжижение гранулированной породы, возможное при ее полной насыщенности водой,

Масса частиц первых четырех гранулометрических диапазонов, называемая мелкоземом, в зависимости от степени увлажнения может находиться в твердом, пластичном и текучем состояниях.

Если к сухому мелкозему, перемешивая его, медленно добавлять воду, то в конце концов наступит момент, когда он приобретет свойство связности и пластичности, т. е. при прокатывании между пальцами уже не будет крошиться. Это состояние соответствует так называемому пределу пластичности. По мере дальнейшего добавления воды пластичный мелкозем становится все более податливым, пока, начиная с некоторого момента, он не начнет растекаться под влиянием собственного веса. В этом случае борозды, проведенные чем-либо на поверхности массы, довольно быстро заплывают. Это новое состояние увлажненного мелкозема соответствует уже другому пределу — текучести.

Массу мелкозема можно считать текучей после того, как он полностью использует свои водосвязывающие возможности. Начиная с этого момента смесь воды и мелкозема может быть уже названа грязью, так как помимо связанной в ней появляется свободная вода, малейшее добавление которой ведет к резкому увеличению текучести.

Интересен, хотя и не освещен в селеведении вопрос: до какой степени разбавления водой грязь может считаться таковой, т. е. когда жидкая грязь превращается в грязную или мутную воду?

В густой суспензии глинистые частицы под воздействием молекулярных сил ухитряются соткаться в трехмерную пространственную сетку, слепить из самих себя своеобразный эластичный каркас. Наличие такой структуры обуславливает для суспензии существование предельного сопротивления сдвигу и зависимости вязкости от скорости сдвига. При перемешивании суспензии непрерывность структуры нарушается, но отдельные фрагменты эластичного каркаса еще сохраняются. В дальнейшем при увеличении интенсивности перемешивания структурные образования измельчаются все больше, что приводит к падению вязкости.

Однако глинистые частицы отличает стремление восстановить эту структуру, как только прекратится или ослабнет механическое воздействие. Часть такой структуры восстанавливается мгновенно, а на воссоздание остальной требуется определенное время. Первое свойство суспензии называют структурной вязкостью, второе — тиксотропией. Они не исключают друг друга и часто взаимодействуют, но их соотношение может быть самым различным и определяется в первую очередь составом и строением глинистых частиц. Описанные свойства структурных суспензий лежат в основе многих любопытных и примечательных явлений. Часто по увлажненному ПСМ или свежим грязекаменным селевым отложениям можно довольно спокойно быстро пройти, но совершенно нельзя стоять, особен-

но переминаясь с ноги на ногу, ибо под влиянием механического воздействия за короткое время она приобретает свойство текучести и ноги глубоко погружаются в грязегравийную жижу.

Начиная с какой-то степени разбавления суспензии водой структурные связи практически исчезают и глинистые частицы приобретают ничем не ограниченную возможность проявлять свою индивидуальность, в том числе предаваться броуновскому движению. Вязкость от скорости перемешивания суспензии теперь уже не зависит.

Поэтому приобретает смысл определение, что грязь — это смесь воды и мелкозема в диапазоне плотности суспензии между пределом текучести и пределом сохранения структуры. Последнее понятие можно также назвать пределом неньютоновского поведения суспензии, ибо в реологии (науке о деформации и течении вещества), в область которой мы с вами слегка вторглись, неньютоновскими жидкостями названы такие, кривые течения (графики зависимости между напряжением и скоростью сдвига) которых не являются прямыми линиями, проходящими через начало координат.

На свойства мелкозема сильнейшее влияние оказывает его минералогический состав. И основную роль здесь играют частицы не таких распространенных минералов, как кварц, кальцит, полевой шпат и слюда, а так называемых глинистых минералов, специфических силикатов, имеющих кристаллическую структуру, основу которой составляет группа SiO_4 . Именно присутствие глинистых минералов делает глину глиной. Подразделяют их на три группы (по названию основных минералов): каолиниты, монтмориллониты и иллиты или гидрослюды. Для нас главное значение имеют водоудерживающие свойства глинистых минералов, а эти свойства выражены у них, я бы сказал, чрезвычайно. Действительно, отношение объема воды, связываемой частицами размером менее 0,001 мм, к их объему приближенно выражается такими числами: неглинистые минералы 0,5, каолинит 1,6, иллит 2,1, кальций-монтмориллонит 4,2, натрий-монтмориллонит 16,5. Последняя цифра означает не что иное, как то, что один объем чистой натрий-монтмориллонитовой глины связывает 16 объемов воды!

Для того чтобы найти плотность селевой массы на пределе текучести, сравним величины относительного объема мелкозема (грязевой массы) тоже на пределе текучести и динамической пористости крупнообломочной составляющей. При этом возможны три варианта: обломки „плавают“ в грязевой массе, количество грязевой массы точно соответствует динамической пористости, грязевой массы не хватает для ее заполнения. В последнем случае оставшуюся свободной часть пористости необходимо „долить“ водой. Теперь сформулируем правило: предел текучести селевой массы данного состава всегда отвечает максимально возможной ее плотности.

Подвижность селевой массы характеризуется безразмерным коэффициентом текучести

$$R = \frac{\gamma_{\text{пт}} - \gamma}{\gamma_{\text{пт}} - \rho_0}.$$

Он изменяется от 0 на пределе текучести до 1 при $\gamma = \rho_0$, т. е. для воды.

И наконец, обратим внимание на одно важное свойство селевой массы — ее способность сохранять структуру, когда нет перемешивания, противостоять распаду. Под последним следует понимать присущее камням и частицам стремление перемещаться в смеси в направлении силы тяжести, стремление, тем более сильное, чем тяжелее эти камни и частицы. Распад (расслоение) — переход смеси в состояние более высокой неоднородности. Б. С. Степанов предложил интенсивность этого процесса характеризовать количественно, периодом полураспада селевой массы, определив его как время, необходимое для осаждения половины массы твердого вещества и образования из него жесткого каркаса. Он же описал способ определения периода полураспада селевой массы, в основу которого положено измерение гидростатического давления на дне сосуда, а также отметил тесную зависимость этого периода от плотности. К недостаткам периода полураспада как показателя неустойчивости селевой массы относится его зависимость от высоты сосуда.

Изменение во времени давления на дне измерительного сосуда, заполненного до высоты h селевой массой плотностью γ , описывается уравнением

$$P_t = gh \left[(\gamma - \rho_0) e^{-e \frac{t}{h}} + \rho_0 \right],$$

где $e = 2,72$ — основание натуральных логарифмов.

Некоторые предположения и преобразования приводят к следующему простому выражению для скорости распада:

$$c_t = ce^{-c \frac{t}{h}},$$

где c — ее максимальное начальное значение. Последнее в первую очередь зависит от коэффициента текучести:

$$c = c_0 R,$$

а потом уже от некоторых других особенностей селевой массы.

При остановке и последующем распаде грязекаменной массы из нее вытекает свободная вода, которая уносит с собой часть глинисто-пылеватых фракций. В результате возникает разница в гранулометрическом составе потока и его же отложений. Эта разница незначительна, если осветленная вода неохотно покидает остановившуюся селевую массу, и, наоборот, весьма заметна, если из свежих отложений вытекает грязевая суспензия. Все определяется тем, насколько хорошим фильтром оказываются сами селевые отложения.

12. СЕЛЬ ИДЕТ!

...И дивное диво
Это для всех, кто увидит сам;
Диво для всех, кто об этом
Слышит рассказы.

Пиндар. Первая Пифийская ода

Кого не пленяет течение жидкости,
кто не любит течение воды!

Ричард Фейнман. Лекции по физике

Сель идет! Если звучат эти слова, то реакция на них всегда бывает однозначной — бегство. И редко, кто находит в себе физические и душевные силы подробно рассмотреть само явление. Я знаю по себе, как, даже находясь в относительной безопасности, трудно не подпасть под гипнотическое воздействие стихии.

Вот как описывает банджир (яванское наименование селя) в одном из своих рассказов Эдуард Дауэс Деккер, прозавший себя Мультипути и посвятивший свое творчество Индонезии:

„Все смолкло. Все прислушалось. Все завопило...

Банджир!

Как описать мне могучий лаводок в горах! С чем сравнить этого водяного исполина, который уносит все, что ему противостоит, сгибает деревья, как соломинки, сводит с лица земли целые леса! О, это естественно, что все народы сохранили воспоминания о могучих потоках младенческой поры своей истории!

Слышимый вначале глухой шорох призывает к бдительности, и кто ему внимает поэтическим слухом сердца, отчетливо распознает в нем призыв к молитве. Этот призыв все народы младенческой стадии развития переводили словами: слушайте, как говорит бог!..

Банджир! Земля дрожит, воздух сгущается так, что трудно дышать, в ушах гудит, словно все звуки соединились в единый гул, который можно было бы уподобить гигантскому „Р“, если бы описать этот звук было мыслимо.

Долин, смятанных в грозный час,
Не слышен робкий зов —
Лишь лаводка громовый глас,
Потоков дикий рев!
Ущелье — облакам приют,
И туча ночевала тут,
Брюхатая дождем,
И, разрешась горой воды,
На скалы грянула с узды
Сорвавшимся конем!

И вот он, черный водопад.
Он растирает камни в прах,
Сечет под корень дуб в лесах
И, затопляя дол и град,
Равнину превращает в ад.

Вода не поднимается, она уплотняется, накапливается. Ее видят перед собою, напротив себя, словно это стена, движущаяся по равнине...

Долой все, что является препятствием, все, что обращается в бегство! Против этой силы нет другой силы, с этой скоростью не поспорит ничья скорость! Долой людей и животных... долой растения, деревья, сады, леса... все долой, все срезано, смыто, скошено, сглажено!

Но эта ярость недолговечна. Она слишком огромна для этого. В оставшемся от наводнения или скоро будут найдены обломки разрушения и трупы всех, что были умерщвлены."

Привожу краткую сводку некоторых словесных зарисовок очевидцев такого редкого явления, как движение грязекаменного потока:

1. Ручьи Тезтор и Адыгене (бассейн реки Алаарча, северный склон Киргизского хребта), 22 июня 1953 г. Поток возник в результате прорыва моренного озера (объем 80 тыс. м³, расход при прорыве 50 м³/с). Объем потока около 300 тыс. м³. Объем переносимых валунов до 25 м³. Описание А. Н. Крошкнина:

„...Селевой поток, передвигаясь волнообразно и отдельными валами, представлял сплошную серую массу консистенции хорошо размешанного строительного раствора, состоящего из воды, валунов, булыг, галечника, песка и мелкозема... Селевые валы высотой до 3—4 м на прямолинейных участках и до 6—8 м на изгибах русла с максимальным расходом 400 м³/с характеризовались чрезвычайной бурностью (турбулизированностью) и волнообразованием, имеющим высоту грязекаменных волн до 2—2,5 м. Галечник и отдельные булыги выбрасывались потоком с шумом и грохотом на расстояние 5 м и более от русла реки; над потоком клубился туман из воды, грязи и твердых частиц. Крупные валуны перемещались относительно друг друга в вертикальном и горизонтальном направлениях, причем послойного движения не наблюдалось“.

2. Хит-Каньон близ Райтвуда (северный склон гор Сан-Габриель, 68 км к северо-востоку от Лос-Анджелеса, Калифорния), 11—12 мая 1941 г. Потоки возникли в результате интенсивного снеготаяния и обводнения продуктов разрушения кристаллических сланцев. Объем серии потоков 920 тыс. м³. Диаметр наиболее крупных камней около 1,8 м, плотность селевой массы 2400 кг/м³. Описание Р. П. Шарпа и Л. Х. Ноублса:

„...Вал создавал шум, подобный грохоту бетона в бетономешалке. Сталкивающиеся валуны сотрясали землю, были слышны всплески жидкой грязи... Фронт передней жидкой волны плавно скользил и был пологим подобно фронту быстро

текущей воды и напоминал волны прибоя, наступающие на морской берег. Однако накатывание волны с перегибом гребня, как это наблюдается для волны прибоя, в данном случае было выражено плохо, тем не менее гребень волны стремился накрыть и опередить ее отставание. Нечетко выраженный накат воды с перегибом гребня, вероятно, частично обязан сглаживанию русла предшествующими потоками. Валуны как бы облицовывали фронт более вязких волн и здесь катились, крутились и скользили, но, как правило, не опережали основание волны. Их движение осуществлялось благодаря воздействию более мелких обломков, движущихся позади валунной дамбы, и они скользили по грязи, текущей между ними. Высота переднего края волн изменялась от нескольких дюймов до 4,5 футов (1,4 м)... По мере того как материал становился более вязким, особенно в поздней стадии активности, скорости уменьшались, и валунный фронт становился плотнее, круче и выше... Брызги грязи подлетали на высоту 20 футов (6 м), и наблюдатели на берегу были ею забрызганы... Временами материал становился настолько вязким, что брошенные в него камни не поднимали брызг и медленно тонули“.

3. Верховья ущелья Мэйфлауер (западный склон хребта Теннел, 100 км к западо-юго-западу от Денвера, Колорадо), 18 августа 1961 г. Потоки возникли на склонах цирка крутизной $35\text{--}41^\circ$ в результате сильного ливня и остановились на уклоне $7,5\text{--}12^\circ$. Описание Р. Р. Карри, наблюдавшего явление со склона цирка с расстояния около 900 м:

„...Послышался сильный грохот, перекрывший раскаты грома. Группа обвальных лавин появилась в четырех различных точках на склоне в верхней части цирка... Даже несмотря на то, что осыпи были пропитаны 48-часовым интенсивным дождем, большие облака каменной или водяной пыли сопровождали это появление... Отдельные потоки представляли собой серию языкообразных валов, движение которых для самого крупного объекта продолжалось около одного часа. Этот поток состоял из 10 более или менее различных волн, каждая из которых двигалась с максимальной поверхностной скоростью 15—16 м/с вблизи от центра потока на высоте 3750 м. Скорость волн потока падала до 1 м/мин и менее, когда он выходил на дно долины... У автора сложилось впечатление, что волны потока являются результатом спускового эффекта ударной волны, проходящей по конусу осыпи, лежащей под углом естественного откоса, и что в верхней части грязекаменного потока действительная скорость сплавляемых валунов может быть значительно ниже, чем наблюдаемая скорость фронта потока... Отдельные угловатые валуны с максимальным диаметром 0,8 м и весом более 340 кг появлялись на поверхности потока. Наиболее крупные валуны были отмечены около вершины наружного края подвижного фронта каждой волны... Прокатывание вниз под фронт волны, как это имело место в случае, описанном Шарпом и Ноублсом для райтвудских потоков, не

наблюдалось, скорее осыпь сдвигалась перед волной в морено-подобную гряду, которая затем включалась в состав фронтального вала".

4. Каутс-Крик (бассейн реки Нискуэлли, массив Рейнир, Тихоокеанский северо-запад США, Вашингтон), 2 октября 1947 г. Поток возник в результате выпадения ливня на ледник и последующего прорыва дождевых и талых вод. Объем потока 38 млн. м³, средняя плотность селевой массы 2000 кг/м³ (видимо, без учета глыб и камней). Описание Р. К. Грейтера, наблюдавшего поток в 8,8 км ниже оконечности языка ледника Каутс:

„Огромное веерообразное море обломков горной породы и бревен устремилось через шоссе к реке Нискуэлли. Сила движущейся массы была столь ужасающей, что громадные валуны стремительно переносились ею как плавучий материал... В большинстве случаев эти валуны не катились, а просто двигались, поддерживаемые на поверхности этой гущи цементно-подобного материала, текущей через участок. Деревья, одно больше другого, диаметрами, превышающими три фута (около метра), были сломаны, как палки, или были вырваны с корнем. Все это сопровождалось грохотом и дрожанием земли, что навело ужас... Материал, перемещаемый потоком, конечно, не был водой, по консистенции он был похож на хороший бетон... Достигая глубины в несколько футов, он (поток) медленно тек, вынося с собой огромные валуны, диаметр которых порой достигал 13 футов (около 4 м)".

5. Факон (бассейн реки Ибей, притока Дюранс, 4 км выше Барселоннет, хребет Парпайон в Котских Альпах, Франция). 13 августа 1876 г. Селевой поток возник в результате выпадения ливня; объем потока 234 тыс. м³, плотность 2190 кг/м³. Описание Шлюмбергера, наблюдавшего поток в месте выхода последнего на конус выноса, получило широкую известность среди селевиков и цитировалось неоднократно; впервые приведено в руководстве по облесению гор П. Демонце, переведенном на русский язык в Тифлисе в 1891 г.:

„...Я увидел огромную черную массу, которая двигалась словно стена, почти без шума спускаясь по руслу. Это был сель, вышедший из гор, который мне удалось наблюдать во всей его силе. Этот сель, быстро продвигавшийся на больших уклонах, скоро появился недалеко от меня, перемещаясь по местности с уклоном не более 0,12 (7°). Его скорость тут же снизилась и скоро не превышала 1,5 м/с. Это была смесь земли и каменных обломков всевозможных размеров, жидкая, как бетон. Перед собой поток двигал целый авангард больших глыб, иногда 5—6-кубометрового объема, наполовину погруженных в очень густую грязь... При малейшем препятствии передовые глыбы... останавливались. Но поток напирал сзади, и уровень селя тогда высоко поднимался (до 7 м над дном русла)... Вся масса вновь приходила в движение до следующей остановки... Как только передовой отряд больших глыб прошел, остальная часть

потока двигалась в русле довольно упорядоченно. Это была масса черного цвета, едва жидкая... Можно было сказать, что это была река грязи. Только временами крупные глыбы заявляли о своем присутствии в селе, подымаясь на секунду, как башни, среди грязевого потока, чтобы сейчас же снова в нем исчезнуть, как только будет пройдено препятствие, заставившее их подняться вверх... Поперечный профиль потока становился выпуклым, когда его уровень поднимался, и слегка вогнутым, когда он падал... Не слышно было почти никакого шума, исключая раздававшийся время от времени скрежет камней о русло или о другие камни. Но поток делался все более и более жидким и двигался с возрастающей скоростью. Скоро вода появилась в изобилии: она яростным ручьем текла поверх селя, двигавшегося более медленно. Тут начался шум... Сель... мог развернуться на обширном конусе выноса. Он расплылся вширь... и движение его сильно замедлилось. Наиболее крупные глыбы, бывшие скрытыми в потоке, касались дна и мало-помалу останавливались, тогда как некоторые поменьше продолжали двигаться, вращаясь и время от времени показываясь из грязи; часто было видно, как они некоторое время плавали, как куски дерева по воде..."

6. Саньер (район селения Жозье, в 3—4 км вверх по реке Ибей от Факона), 8 августа 1876 г. Поток возник при выпадении ливня. Описания Зефирена Доля, Жана Бегю и Фирмена Одиффре, имевших отношение к строительству противоселевых запруд, также приведены у П. Демонце:

„...Раздался глухой шум, похожий на грохот, создаваемый артиллерийской колонной, проходящей рысью по мостовой... Затем стало возможным различать, кроме грохота, еще отдельные удары от столкновения налетавших одна на другую глыб. Несколько секунд спустя я увидел сель ужасного вида, который появился в 50 м выше запруды № 7. Он был высотой в 7—8 м и состоял из обломков разных размеров, постоянно сталкивающихся между собой... Я заметил, как и все рабочие, что барак двинулся раньше прибытия селя; ему оставалось до него еще 3—4 м, насколько расстояние позволило это рассмотреть... Рабочие между прочим объявили мне, без всякого вопроса с моей стороны, что они видели, как довольно тяжелые сани..., сильно нагруженные камнями, перевернулись еще тогда, когда голова селя находилась от них в нескольких метрах...

Я прекрасно видел, что эта хижина была снесена в момент, когда голова колонны селя находилась от нее еще в нескольких метрах... Я увидел, что приближаются крупные глыбы камней, поднявшихся почти отвесной стеной 5-метровой высоты...

Я видел довольно много камней размером поменьше кулака, выброшенных в воздух на 15 м... Впереди это была куча крупных глыб, спускавшихся, вращаясь друг около друга. Это движение производило страшный грохот, к которому иногда присоединялся треск, как бы от дерева, вырванного бурей с корнем. Эта куча глыб, промежутки между которыми были

заполнены грязью, имела в длину 3—4 м. Голова селя образовала наклонную плоскость в 2—2,5 м высотой“.

7. Куро (бассейн реки Терек, северный склон Главного Кавказского хребта, район селения Казбеги), 8 августа 1955 г. Селевой поток возник при выпадении трехтактного ливня. Максимальный расход 52 м³/с, объем 562 тыс. м³, плотность 2100 кг/м³. Описание В. Е. Иогансон:

„Сель появился... из-за поворота русла в виде вала высотой порядка 1—1,5 м. Он представлял собой густую грязь, включающую камни диаметром до 1 м, реже встречались валуны диаметром 2 м и более. Движение шло волнами; спады чередовались с новыми грязекаменными валами. Временами, когда двигалась большая масса крупных камней, поверхность потока становилась выпуклой. Более крупный материал постепенно отжимался к берегам и откладывался, затем вновь подхватывался очередным валом. При этом поверхность потока напоминала реку, наполненную как бы шугой черного цвета... На поворотах и в сужениях поток постоянно создавал заторы, которые быстро прорывались; скорость его при этом возрастала до 3—5 м/с. Прорвавшийся вал эродировал берега, а селевая масса выплескивалась на стенки русла, и из нее вылетали отдельные камни. Движение потока сопровождалось сильным шумом“.

Между прочим, речка Куро, имеющая и другое название — Бешеная Балка, знаменита тем, что о ней упоминал А. С. Пушкин в своем „Путешествии в Арзрум“. Помните?

„Бешеная Балка также явилась мне во всем своем величии: овраг, наполнившийся дождевыми водами, превосходил в своей свирепости самый Терек, тут же грозно ревевший. Берега были растерзаны; огромные камни сдвинуты были с места и загрозможили проток. Множество осетинцев разрабатывали дорогу. Я переправился благополучно“.

8. Нигори (бассейн реки Оматикава, восточный склон хребта Хида, 15 км к северу от горы Яригатаке, остров Хонсю, Япония), 10 июля 1964 г. Грязекаменный поток возник при ясной погоде при интенсивном снеготаянии — 7 и 8 июля выпадали дожди. Максимальный расход около 430 м³/с. Описание Такуро Ямадзакки, который наблюдал явление в районе устья реки Нигори.

„Прямо на глазах грязекаменный поток подобно черной змее захватывал отлогие речные берега, выкорчевывал высокие деревья, многие из которых захватывались потоком... В авангарде грязекаменного потока, подпрыгивая и залетая вперед, двигались стволы и обломки попавших в поток деревьев. В голове потока двигались несколько десятков глыб по несколько метров в диаметре и, кроме того, большое количество валунов поменьше... Ниже водопада капли грязи кружились в воздухе подобно пыли“.

9. Южная часть долины Сан-Хоакин (Калифорния), 1905 г. Впечатления управляющего ранчо Сан-Эмигдио Дж. К. Дугла-

са в записи Г. Р. Джонсона из Лос-Анджелеса цитируются по статье Э. Блэкуайлдера:

„Когда он [поток] вышел из узкой щели бокового каньона, его сопровождало облако пыли, образовавшееся вследствие разрушения огромной массы сухой почвы о выступы при ее стремительном продвижении вниз по каньону. Сквозь пыль можно было заметить мелькание огромных движущихся валов с одиноким непрерывно вращающимся деревом. Пройдя около полутора миль (2,4 км) ниже выхода малого каньона, эта волна полностью остановилась, только через несколько минут за ней последовала другая, более крупная и быстрая, чем первая. Она не поднимала пыль, так же как и следовавшие за ней волны, однако огромные глыбы, большинство из которых достигало по весу нескольких тонн, подпрыгивали над поверхностью, как пробки, поддерживаемые снизу земляной массой. Эта волна проследовала на полмили (0,8 км) дальше вниз по каньону, чем первая, и также остановилась, заняв всю ширину основного каньона, достигавшую в этом месте четверти мили (0,4 км). Через несколько минут пронеслась еще одна волна грязи, за которой последовали следующие через интервалы в несколько минут. Каждая последующая волна была жиже и имела большую скорость по сравнению с предыдущей...”

10. Долина Сухой Хапицы (бассейн реки Камчатки, район Ключевской группы вулканов), лето 1956 г. Грязекаменные потоки возникли во время ливней после извержения вулкана Безымянный. Описание Г. С. Горшкова и Г. Е. Богоявленской:

„Вода реки Сухой Хапицы переполнялась рыхлым материалом, образуя густую, но очень подвижную грязь, в которой, подобно деревьям, легко плыли крупные камни. Особенно удивительно было видеть, как в заводях, после водопадов, камни медленно плавали и кружились в струях противотечений. Масса твердого материала составляла 90—95%...”

11. Акжар (бассейн Аксая, северный склон Занлийского Алатау), весна и начало лета 1969 г. Потоки вызваны ливнями. Расход до 10 м³/с. Описание В. И. Полянской:

„Первый селевой вал — это густая грязевая масса с камнями от четверти до одного метра в диаметре, настолько компактная и плотная, что движется как одно целое, словно утюг, медленно, но неотвратно. За головой движение жижи ламинарное без струй и завихрений. В отдельные моменты кажется, что камни медленно плывут. С увеличением скорости по мере разжижения потока камни догоняют друг друга, соударяются, перекатываются. Движение становится все более турбулентным”.

12. Акулисчай (бассейн реки Аракс, юго-западный склон Зангезурского хребта), 21 мая 1884 г. Описание М. П. Псарева — доложено 9 апреля 1885 г. на заседании Кавказского отделения Русского технического общества:

„...В реке стала быстро наплывать сверху жидкая грязь и вслед за ней показались стремительные надвигающиеся массы

густой грязи, смешанной с камнями и унесенными сверху деревьями. Массы эти следовали одна за другою с перерывами в несколько минут и, выступая из берегов оврага, разрушали или совершенно уничтожали встречавшиеся на своем пути постройки и сады; причем движение селя не представлялось непрерывным потоком, но происходило, то задерживаясь в своем течении, то вновь устремляясь по реке с громадной скоростью. Все это продолжалось не более одного часа, после чего уже грязь стала протекать в незначительном количестве по дну оврага...

В некоторых местах вследствие страшной быстроты движения селя были унесены довольно большие дома вместе с имуществом, в некоторых же селя, медленно двигаясь, остановился перед небольшими каменными заборами, не повредив даже последних... Селя иногда проходил по узким переулкам, почти под прямым углом к общему направлению его течения, увлекая при этом камни больших размеров".

13. Приток реки Хиспар (бассейн реки Хунза, Каракорум), 8 июля 1892 г. Описание У. М. Конвея:

«...Достигнув устья глубокого узкого бокового сухого русла, мы услышали шум, подобный грому, и увидели огромную черную волну, быстро несущуюся вниз... Когда мы достигли русла, основная масса материала прошла, и лишь продолжал быстро течь черный поток густой грязи. Он постепенно становился более жидким, пока вместо грязи не потекла черная вода... Мы... едва успели выскочить из вреза, когда другая громадная грязевая лавина стремительно пронеслась вниз. Это было ужасающее зрелище. Масса грязи увлекала груды обломков породы, переворачивая их, как гальку, которые подпруживали грязевой поток и замедляли его движение, увеличивая, однако, его мощность. Каждый из больших обломков породы, формировавших „голову“ этой лавины, весил много тонн, наибольший достигал размеров 10-футового куба (3×3×3 м). Материал, который следовал за ними, наполнял русло до ширины около 40 и глубины 15 футов (12,2 и 4,6 м). Все это двигалось со скоростью около 7 миль в час (11,3 км/ч или 3,1 м/с). Когда фронт лавины прошел и глубина движущейся массы снизилась, смесь состояла наполовину из грязи, наполовину из обломков породы и двигалась быстрее. Вновь и вновь наиболее крупные камни преграждали дорогу, грязь накапливалась позади них, и вскоре сносила преграду... Трижды русло подвергалось ужасному воздействию этого явления и каждый раз лавина находила новый выход к основной реке и полностью изменяла конус выноса. Третья лавина была наибольшей, она удачно навалила массивную дамбу камней поперек русла почти у самых наших ног».

14. Бассейн Среднего Талгара (северный склон Занлийского Алатау), 15 июля 1974 г. Описание В. И. Шушарина и И. Н. Маркова:

„Наиболее крупные валуны, до 3 м в диаметре, двигались

в передней части вала. Продвижение селевого вала сопровождалось нарастанием шума, переходящего в грохот, в котором преобладали низкие звуки. При прохождении селя по очагу, где уклоны достигали 22° , из потока вылетали камни, грязевая пыль, искры от ударов крупных валунов. Земля в непосредственной близости от русла вздрагивала“.

15. Кенколсай (южный склон Курамнинского хребта, Западный Тянь-Шань), 18 августа 1966 г. Описание И. Н. Степанова:

„После четырех часов сильного грозового ливня около 19 ч 20 мин в районе наблюдения прошла первая волна селя высотой 2—3 м со скоростью около 7 м/с...“

Волна селя была как бы приподнята над ложем русла и на 90% состояла из щебнистого материала с размерами частиц не более 10—20 см. Высота волны менялась в зависимости от ширины русла и местами достигала 8 м. Очевидно, тело потока обладало большой плотностью, так как выбрасываемая потоком на тропу селевая масса быстро застывала. О большой плотности свидетельствует тот факт, что камни весом 1—3 кг, брошенные в поток, плыли на поверхности некоторое время и лишь после этого погружались в селевую массу. В 19 ч 25 мин уровень потока упал, скорость уменьшилась до 4—5 м/с. Несмотря на это, даже на расстоянии 5 м от берега чувствовалось сотрясение почвы. В середине потока наблюдались всплески на высоту до 1 м. На поверхности потока были замечены деревья, кусты, куски дерна и крупные камни. Первая волна была черного цвета, последующие имели коричневый оттенок.

В 19 ч 52 мин прошла вторая волна с несколько меньшей, чем первая, скоростью 6—6,5 м/с, затем с промежутками 5,5; 6; 12 и 5 мин прошли еще 5 волн, при этом расход потока увеличился примерно до 200—220 м³/с. Все семь волн селя — это грязекаменные потоки, прошедшие по различным саям правобережья р. Кенколсай“.

16. Этим номером обозначим описание движения малого селевого потока на Кокчеке, данное Т. Л. Киренской (см. эту же стр. 15).

Картины движения грязекаменных селей, нарисованные разными свидетелями, очень непохожи друг на друга. Однако так как размеры, плотность и условия движения потоков были различны, не удивительны и разительные противоречия в изложении очевидцев. Описания движения грязекаменных потоков можно систематизировать набором следующих фактов:

а) движение селей — последовательное движение валов (1, 2, 3, 7, 9, 12, 13, 15),

б) селя — река грязи, медленно текущая и выносящая валуны, кружащая их в грязеворотах (4, 10),

в) плавание камней (4, 5, 10, 11, 15),

г) хаотическое движение камней (1, 13),

д) выбрасывание камней из потока (1, 6, 7),

е) брызги грязи и грязевая пыль над потоком (1, 2, 8, 14),

ж) в голове потока движется нагромождение особо круп-

ных глыб, подталкиваемое более разжиженным материалом (2, 5, 6, 8, 11, 13, 14),

з) валуны движутся медленнее, чем основное тело потока (8; 16),

и) движение потока сопровождается очень сильным шумом и грохотом (2, 3, 4, 6, 7, 13, 14),

к) движение потока почти бесшумно (5).

Описания сухой (9) или каменной (3), а не грязевой пыли над потоком, видимо, относятся к предположениям, так как наблюдатели находились на большом расстоянии от места событий. Воздействие же грязекаменного потока на препятствие до того, как они соприкоснулись (6), можно, вероятно, объяснить воздушной волной перед фронтом потока, как это и предполагал один из свидетелей явления Жан Бегю. Для этого нужно, чтобы скорость движения самого селя была гораздо более высокой, чем та, которой обладал саньерский поток. Другая альтернатива — разжижение водонасыщенной породы, на которой находились сдвинувшиеся предметы, под вибрационным воздействием приближающегося потока. Описанный эффект мог быть и следствием иллюзии, связанной с отмеченным одним из наблюдателей наклоном плоскости фронта потока. Свидетели, созерцавшие явление со значительного расстояния, местоположение фронта скорее всего определяли по гребню передового вала, который на несколько метров отставал от нижней части вала, уже столкнувшейся с препятствием.

Большинство свидетелей, как явствует из описаний, видело поток на конусах выноса или на дне широких долин. Мне пришлось неоднократно наблюдать за искусственно вызванными (но естественно сформированными в природном селевом очаге) крупными грязекаменными потоками в бассейне реки Чемолган. Диапазон максимальных расходов в экспериментах 1972, 1973, 1975 и 1976 гг. составлял 45—450 м³/с.

Исключительную бурность грязекаменного потока, особенно на крутых участках русла, изобилующих изгибами и скальными выступами, создает крупнообломочный каркас потока, который, непрерывно и сильно деформируясь, почти мгновенно выжимает, выбрызгивает жидкую грязь вместе с мелкими камнями в воздух над потоком. Поверхность потока в таких местах представляет собой трехкомпонентный (мелкозем, вода, воздух), как бы кипящий слой, в котором время от времени на мгновение появляются лоснящиеся спины громадных валунов. Над потоком, особенно на „грязепадах“, клубятся облака грязевой пыли, везде господствуют пляшущие грязевые протуберанцы. Иногда отдельные глыбы или целые их скопления, соизмеримые с шириной и глубиной потока, увлекаются им, скользят и влачатся, задевая за выступы руслового ложа. В узких скальных каньонах глыбы порой заклинивает, тогда поток переливается через них стремительным грязекаменным каскадом. Ниже грязепадов, где скальное русло расширяется, селевая масса, перемешиваясь, вращается как бы в мощном

грязевороте, прежде чем устремиться далее вниз. В местах расширения русла и снижения уклона течение, наоборот приобретает более упорядоченный вид и спокойный характер. Именно в этих местах особо ощущается высокая плотность потока, его вещественная сущность и неудержимая мощь. Зачастую у одного берега можно видеть скользящую ровную ленту потока, в то время как у другого — грязекаменная жижа беснуется в дьявольской толчее.

Передняя часть грязекаменного потока в зависимости от характера русла и величины уклона может представлять собой то настоящую „голову“ — нагромождение крупных валунов и глыб,— медленно, иногда даже с остановками, двигающуюся вперед под давлением более разжиженной и обогащенной мелкоземом селевой массы, то черное чудовище, стремительно несущееся вперед, иногда даже как бы прыжками, с блуждающими щупальцами и призрачным фронтом, непрерывно меняющим очертания. Анестезирующий запах, грязевая пыль, дрожание земли, рев и гул, почти неслышимые в общем грохоте всплески жидкой грязи, новые и новые катящиеся грязекаменные валы... Мощь селя, его неповторимое дыхание и мрачная красота навсегда оставляют человека эмоционально потрясенным.

Селевая масса, имеющая пластические свойства, в первой стадии движения скользит при так называемом структурном режиме. В этом случае почти вся масса как единое целое скользит по тонкому слою разжиженной глинистой суспензии. Само тело (ядро) потока практически не деформируется, тем более что оно армировано каменными включениями. С увеличением скорости движения структурный режим должен смениться сначала ламинарным, а затем турбулентным. Однако тело потока на подвижной подушке из суспензии может сохранять целостность непосредственно до появления развитой турбулентности при попадании селевой массы в русло с большим уклоном и шероховатостью.

Структурный режим движения грязекаменных потоков наблюдается исключительно при малых значениях глубины и уклона, причем оба этих фактора могут частично компенсировать друг друга по принципу: меньший уклон — большая глубина, и наоборот.

Мне приходилось наблюдать в селевом очаге Кокчека (см. этюд 15) грязекаменные микропотоки (ширина 0,5—1 м, глубина 0,2—0,3 м, скорость 0,5—1 м/с) со структурным режимом движения. В кулуарах с легким шелестом ползли грязекаменные ленты, их спокойная поверхность, иногда слабо шевелящаяся, напоминала поверхность мелкообломочной осыпи. Очень тонкий (миллиметры) грязевой слой на контакте с бортами русла имел большие градиенты концентрации твердой фазы и скорости.

Остановимся специально на повсеместно отмечаемой склонности грязекаменных потоков двигаться не непрерывно, а последовательными волнами. Распространенное объяснение этого

факта связано с приписыванием селевым потокам заторного характера движения. Так, С. М. Флейшман пишет: „В результате образования заторов и последующих их прорывов селевой поток движется валами или волнами“. При искусственном воспроизведении грязекаменных потоков на Чемоляганском полигоне ни в одном месте далеко не прямолинейного скального русла заторы не образовывались. Несмотря на это, у потоков был четко валообразный характер движения.

Я отнюдь не утверждаю, что заторы не могут случаться вообще. Но я отрицаю заторный характер движения, как свойственный самой динамической сущности грязекаменного потока. При медленном движении, если мощность потока недостаточна, голова селя зачастую останавливается или замедляет ход на любых участках русла до подхода подкреплений. В местах же сужений или у других препятствий такая остановка, естественно, более вероятна. Однако валообразование скорее присуще не агонизирующим образованиям, а, наоборот, крупным потокам, неудержимо рвущимся вперед и не страдающим от дефицита массы.

Появление валов могут вызвать:

- 1) перерывы в поступлении воды в селевой очаг взаимодействия,
- 2) последовательное поступление валов из разных очагов,
- 3) обрушение масс мокрой породы с откосов вреза,
- 4) тормозящее влияние группы особо крупных глыб и валунов, соизмеримых с шириной и глубиной потока,
- 5) волнообразование при сверхбурном состоянии потока, т. е. при сочетании малых глубин, повышенного сопротивления и тем не менее относительно высокой скорости.

Можно, конечно, с известной натяжкой назвать затором и явление, обозначенное в списке возможных причин валообразования номером 4, но все-таки затор — это заклинивание и нагромождение глыб, валунов и деревьев, полностью останавливающие поток. Что при этом происходит? Лишенная возможности двигаться селевая масса мгновенно превращается в селевые отложения, хотя и с повышенной податливостью к сдвигу (из-за тиксотропии, см. этюд 11). Вновь подошедший поток вполне может сдвинуть весь „затор“, но при этом он должен затратить дополнительную энергию, потеряв скорость и, следовательно, уменьшив расход. Другое дело — скопление воды выше временной плотины. Последствия прорыва здесь прямо связаны с накопленным объемом и величиной подпертого уровня. Но приписывать грязекаменной массе прорывные свойства воды непозволительно, у нее и без того слишком много пакостных свойств.

Возможно, что образование последовательных волн, помимо всего прочего, связано с пульсационным характером транспортно-сдвигового процесса в селевом очаге, отмеченным Т. С. Степановой в чемоляганских экспериментах. Я имею в виду упорядоченное чередование зон повышения и понижения скорости

движения потока, постепенно превращающегося в полноценный грязекаменный, и интенсивности захвата потоком обломочной породы. А может быть, это явление следует трактовать не как повод для валообразования в нижележащем селевом русле, а как следствие причин 4 и 5.

Таким образом, полагая, что сели в зависимости от состава массы и условий движения могут вести себя по-разному, логично предложить следующую классификацию состояний и режимов движения грязекаменных потоков:

Тип движения	Состояние потока	Режим движения	
		крупных обломков	гязи
Скольжение	—	Структурный	
Течение	Спокойное	Упорядоченный	Ламинарный
	Бурное	Хаотический	Турбулентный
	Сверхбурное	Лавинный	

Структура селевой массы (см. этюд 11) настолько сложна, что попытка дать полноценное физико-статистическое описание ее движения и определить и систематизировать все расчетные параметры заранее обречена на неудачу. Многие, и иногда весьма достойные, исследователи представили достаточное подтверждение этому. Главным препятствием на пути решения задачи являются скудность количественной информации и невозможность производить измерения в самом теле грязекаменного потока. Поэтому пока селевая масса описывается как однородная среда, а все ее параметры — скорость, плотность, вязкость — являются усредненными, в какой-то мере фиктивными, не соответствующими действительным свойствам отдельных компонент.

Реологическое уравнение селевой массы в достаточно общем и приемлемом варианте имеет вид

$$g(H-y)(\sin \alpha - \operatorname{tg} \psi \cos \alpha) = \frac{\mu}{\gamma} \frac{dv}{dy} + \left(\beta H \frac{dv}{dy} \right)^2,$$

где y — расстояние от дна, H — глубина потока, v — скорость течения массы, остальные обозначения будут разъяснены чуть позже.

Принято считать, что в турбулентных водных потоках влияние вязкости пренебрежимо мало и первый член правой части уравнения с успехом может быть опущен. Наоборот, при ламинарном режиме течения жидкости ситуацию определяет именно он. В реальной грязекаменной массе в зависимости от уклона, глубины и скорости течения возможен один из двух режимов, поэтому нет оснований для предпочтения какой-либо из двух половинчатых моделей.

В результате ряда манипуляций с реологическим уравнением, иногда вынужденных и потому не всегда привлекательных, получены такие уравнения для средней и максимальной (поверхностной на стрежне) скоростей грязекаменного или грязевого потоков:

$$\bar{v} = \frac{2}{3} \frac{H^2}{S} \left(\frac{F^2}{H^4} + \frac{S}{H} \right)^{3/2} - \frac{4}{15} \frac{H^3}{S^2} \left[\left(\frac{F^2}{H^4} + \frac{S}{H} \right)^{5/2} - \frac{F^5}{H^{10}} \right] - \frac{F}{2H},$$

$$v_m = \frac{2}{3} \frac{H^2}{S} \left[\left(\frac{F^2}{H^4} + \frac{S}{H} \right)^{3/2} - \frac{F^3}{H^6} \right] - \frac{F}{H}.$$

Для снижения громоздкости записей здесь использованы обозначения

$$F = \mu / 2 \beta^2 \gamma \quad \text{и} \quad S = \frac{1}{\beta^2} g (\sin \alpha - \lg \psi \cos \alpha).$$

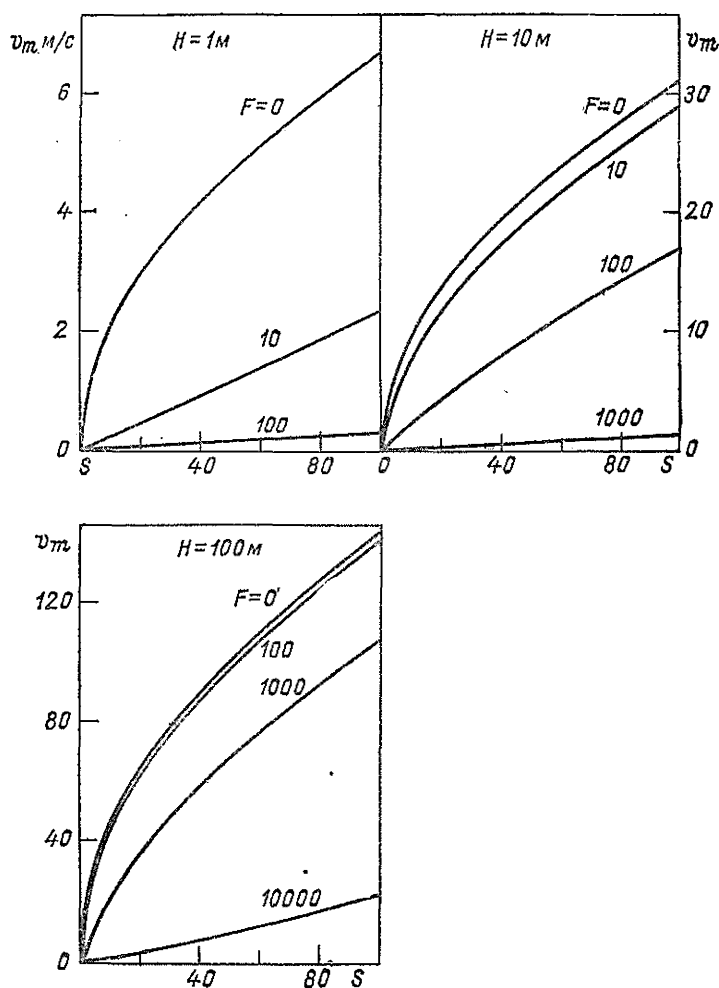
Сопротивление движению грязекаменного потока оказывает внутреннее трение. Под последним следует понимать противодействие среды, возникающее при относительном перемещении отдельных элементов селевой массы. Доминирующую роль здесь играют деформации, связанные с относительным проскальзыванием и соударением камней разного размера. В движущемся потоке, особенно в голове его, камни и глыбы часто образуют замкнутые группы, скользящие в данный момент времени относительно друг друга, чтобы чуть позже образовать новые группы. Происходит как бы непрерывная переупаковка камней и обломков.

В реологическом уравнении, так же как и в выражении для скоростей течения, три показателя отображают различные стороны проявления внутреннего трения в селевой массе: динамический угол внутреннего трения ψ , коэффициент динамической вязкости μ и коэффициент сопротивления перемешиванию β .

Динамический угол внутреннего трения определяет величину сопротивления, которое, чтобы поддержать движение, должно постоянно преодолевать.

Коэффициент вязкости отображает трение при скольжении отдельных слоев и элементов селевой массы друг по другу. Чем крупнее включения, тем сильнее они взаимодействуют и проникают в соседние слои и тем больше энергии рассеивают.

Коэффициент сопротивления перемешиванию представляет собой среднее относительное расстояние, на которое перемещаются элементы селевой массы в направлении, перпендикулярном продольной оси селевого потока, прежде чем вовлечется в общее продольное движение. Для водного потока это относительный „путь смещения“, т. е. среднее расстояние поперек



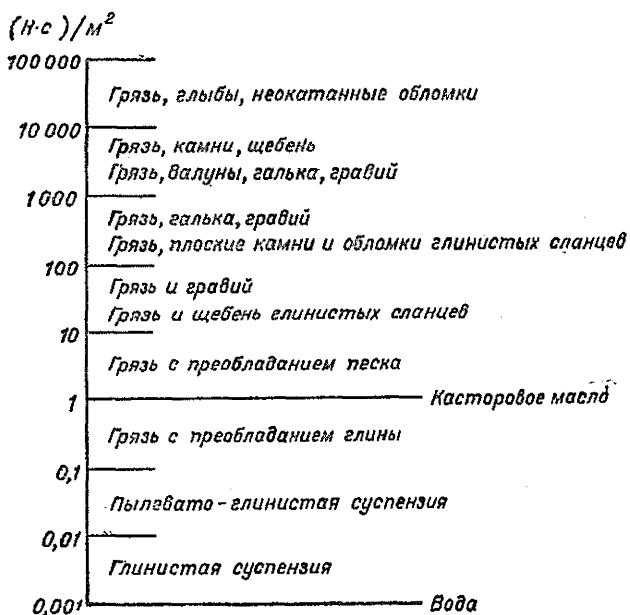
Зависимость максимальной поверхностной скорости селевого потока от его глубины, свойств селевой массы и уклона.

потока (в долях от его глубины), на которое успевают переместиться элементарные вихри до того, как исчезнут.

Все показатели внутреннего трения связаны с коэффициентом текучести R :

$$\operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} \psi_0 (-\ln R), \quad \mu = \mu_0 (-\ln R), \quad \beta = \beta_0 R.$$

Сущность уравнений для расчета скорости течения и роль отдельных параметров хорошо раскрывается даже при беглом анализе графиков, которые построены специально для чрезмерно расширенных против обычного диапазонов изменения глубин и скоростей, чтобы судить о том, к чему могут привести крайние проявления каких-нибудь свойств селевого потока. Представляется очевидной закономерность убывания роли вязкости с ростом глубины потока. Если в метровом слое селевой массы вязкость полностью диктует свои условия, то в 100-метровой толще ее влияние уже несравненно меньше. Вязкость потока определяется тремя основными факторами: плотностью селевой массы, гранулометрическим составом и свойствами породы, в том числе минералогией глинистой фракции. На основании отрывочных обсчетов можно полагать, что величина коэффициента динамической вязкости селевой массы $(\text{н} \cdot \text{с})/\text{м}^2$ находится в пределах:



13. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И СЕЛИ

...Когда землетрясение происходит в холмистой или гористой местности, любой материал, который находится в состоянии неустойчивого равновесия, начинает двигаться вниз.

Джон Ходжсон. Землетрясения и строение Земли

Сильные землетрясения часто провоцируют возникновение селевых потоков. Сдвиговый селевой процесс обычно начинается одновременно с главным сейсмическим толчком и может осуществляться и при дефиците увлажнения ПСМ. Сейсмогенные сели, как правило, внезапны, имеют большие размеры и, если так можно выразиться, характеризуются массовостью.

Грандиозный селевой поток, вызванный землетрясением, произошел на горе Уаскаран в Перу 31 мая 1970 г. В силу своей исключительности он подробно описан в этюде 3.

В 1949 г. в районе стыка Зеравшанского и Алайского хребтов разразилось мощное Хаитское землетрясение, вызвавшее грандиозные селевые потоки.

Первые два толчка силой 6 и 8 баллов случились утром 8 июля, а в 9 ч 58 мин 10 июля последовал главный 10-балльный удар. Землетрясение разрушило поселок Хаит и близлежащие кишлаки. Одновременно в различных местах бассейна реки Ярхич, правого притока Сурхоба (так называется среднее течение Вахша, который совместно с Пянджем дает начало крупнейшей водной артерии Средней Азии — Амударье), начались массовые обвалы и оползни.

Вот как описывает свои впечатления К. В. Станюкович, находившийся в это время в верховьях реки Ярхич с геоботанической экспедицией, лагерь которой был расположен на плоском выступе хребта над кишлаком Даштимухамеджон.

„...То, что мы увидели, было удивительно и страшно: весь склон над нами кипел, кишел каменными обвалами. Грохот был невозможный, какая-то смесь треска, лязга, визга, уханья. Щебень, камни и целые скалы, одни величиной со стол, другие с грузовик, вертятся и подпрыгивая, неслись вниз, на нас. Большая часть этих камнепадов сливалась по понижениям в каменные ручьи и реки. Сталкиваясь и прыгая друг через друга, они катились вниз“.

Главные события развернулись в нижнем течении реки Ярхич. Здесь на склонах горы Чокурak (2578 м) произошел обвал. Лавины коренной породы двигались с трех сторон, причем две — навстречу друг другу. Возникшая в результате их столкновения громадная водонасыщенная лавина суглинков и раздробленной скальной породы общим объемом 400 млн. м³

ринулась вниз по Дарихаузу — левому притоку реки Ярхич. Промчавшись 5 км со скоростью около 30 м/с, она в сопровождении пылевого облака с ужасающим грохотом вырвалась из ущелья, в течение нескольких секунд завалила Хаит и, перегорив течение реки Ярхич, уничтожила кишлак Хисарак, находившийся в 1,5 км от реки. На дне долины грязекаменная масса покрыла площадь 7 км², над погребенным Хантом толща отложений кое-где достигла 80 м.

Перед грязекаменной лавиной шла воздушная волна, вырывая деревья с корнем и отбрасывая их на сотни метров.

В долине реки Ясман, которая впадает в Ярхич справа недалеко от устья, в результате массовых оползней и обрушений покровных суглинков, особенно с правого борта долины, образовался грандиозный селевой поток. Настоящая грязевая река, местами шириной до 2 км, потекла по долине, затопила ее нижнюю часть, погубив несколько кишлаков, уничтожив сады, и в конечном счете оставила около 145 млн. м³ отложений.

Другой грязевой поток объемом 30 млн. м³ зародился на правом склоне долины Ярхича напротив селения Ярхичкала, пересек реку и завалил селение слоем грязи 5—7 м.

В районе кишлака Ярхичмиона поток с правого борта долины поднялся на противоположный, имеющий уклон 5—6°, на расстояние 600 м.

27 марта 1964 г. во время знаменитого аляскинского землетрясения (эпицентр находился в 120—130 км к востоку от города Анкориджа) во многих местах обрушились лед и горная порода. Эти скально-оползневые лавины при движении преобразовались в мощные грязекаменные потоки, покрывшие отложениями многие ледники. Лавины на первых сотнях метров набирали большую скорость и селевые потоки проходили несколько километров по поверхности ледников, несмотря на очень малый уклон, часто менее 5°.

Один из крупнейших потоков сошел с хребта Вакселя на поверхность ледника Стеллера. Его застывшее тело длиной 6,5 км и шириной до 2 км имеет объем около 10 млн. м³. Место отрыва первоначальной лавины расположено на высоте 3000 м. Если лавина первые 600 м проходила по 43-градусному склону, то селевой поток последние 3 км двигался при уклоне менее 2°. На соседнем леднике Мартин-Ривер отложилось 24 млн. м³ селевой массы.

Со скального массива Шэттед-Пик (Чугачские горы) лавинные сели сошли в трех различных направлениях. Один спустился на ледник Сэдльбэг, а два — на ледник Шерман. Объем крупнейшего потока на последнем оценивается в 25 млн. м³. На леднике Снукс отложилось 8,4 млн. м³ грязекаменной массы.

В системе береговых аляскинских хребтов Чугач, Вакселя и Кенайского полуострова 26 ледников были отмечены лавинными селями, а общее число селей превышает 50. Селевые потоки, вызванные землетрясением 27 марта, не представля-

ются из ряда вон выходящими. Такие явления имели место в этом районе и до 1964 г. и позже.

В горах Святого Ильи, в юго-восточной части, на территории и в окрестностях национального парка Глейшер-Бей, прошли селевые потоки на следующих ледниках: Кэйзмент (1945 г.), Джона Гопкинса (1961 г.), Мэржери (1961 г.), Нетленд (1952 г.), а в Чугачских горах — на ледниках Смит (1955 г.), Брин Мэр (1960 г.), Вэсэр (1958 г.), Бэрри (1960 г.), Серпентин (1963 г.), Сюрпризный (1963 г.), Пигот (1945 г.). Площадь селевых отложений была от 0,5 до 4 км², а длина потоков от 1,5 до 3,5 км.

После марта 1964 г. лавинные сели прошли по поверхности ледников Эллин (1965 г., длина 7,5 км) в Чугачских горах, Хорошей погоды (1965 г., 10,5 км) в горах Святого Ильи, Блоссом (1965 г., 1,5 км) и Мэвин (1965 г., 3,0 км) в районе горы Святого Ильи (5488 м). Естественно, что землетрясение могло повысить вероятность формирования лавинных селевых потоков, так сказать, заложить мины замедленного действия.

19 мая 1971 г. в результате 8-балльного землетрясения грязекаменные потоки прошли по ручьям и ложбинам бассейна Кобди, притока Артыка, впадающего в Индигирку.

14. ВУЛКАНЫ И ЛАХАРЫ

Вулканы — это нечто солидное, на них можно положиться.

Станислав Лем. Насморк

Грандиозные водяные потоки, столь неожиданно низвергающиеся и уносящие с собой в долину рыхлые массы более старых вулканических извержений вместе с новым выбрасываемым пеплом, появляются внизу в виде потоков жидкой грязи, которые все превращают в пустыню.

Фридрих Ратцель. Земля и жизнь, 1901 г.

Особое место среди селей занимают потоки вулканогенного происхождения, получившие даже специальное наименование „лахары“. Размеры и мощность лахаров могут быть грандиозными, в движении могут участвовать десятки и даже сотни миллионов кубических метров грязевой и грязекаменной мас-

сы. Селевые потоки на склонах вулканических конусов формируются:

при излиянии кратерных озер, в частности при извержении через озеро (горячие лахары);

при стремительном таянии льда и снега во время извержений;

при переходе палящих лавин, или пирокластических (пепловых) потоков, состоящих из очень подвижной смеси обломочного материала и раскаленных газов, в лахары, когда существуют условия обводнения (катастрофическое снеготаяние, реки);

при выпадении интенсивных ливней, особенно вскоре после извержения (холодные лахары);

в результате извержения с выделением тефры (пепла) во время ливня.

В вулканических районах опаснее всего не сами извержения, а вызванные ими лахары. Именно они несут основную ответственность за гибель людей.

Говоря о вулканогенных селях, нельзя не бросить взгляд сквозь тьму веков и не вспомнить последний день Помпеи в 79 г. н. э. В этот день, когда Помпеи засыпало пеплом, городок Геркуланум оказался под 20-метровой толщей грязекаменной массы, принесенной лахаром, который возник в результате излияния сильнейших ливней на склоны Везувия. Селевые отложения Геркуланума оказали археологам при раскопках гораздо более серьезное сопротивление, чем пепловые Помпеи. Лахары сопровождали извержение Везувия и в 1631 г., а весной 1906 г. во время ливней грязекаменный поток достиг городка Резина.

17—18 февраля 1854 г. в результате взрыва вулкана Шивелуч (3335 м) на Камчатке из вновь возникшего кратера во все стороны, кроме северной, хлынули пирокластические потоки, прошедшие расстояние до 20 км. Ниже образовались мощные лахары, проследовавшие на западе до реки Еловки, а на юге до реки Камчатки.

12 ноября 1964 г. новое извержение Шивелуча породило лахары, которые 400-метровыми лентами ворвались в лес и широко разлились, раскидав повсюду глыбы диаметром до 5 м. Дальше всего потоки проникли по руслам рек Байдарной и Сухой Бекеш.

При извержении Авачинской сопки (2738 м) 28 марта 1938 г. пирокластические потоки вызвали интенсивное снеготаяние и, как следствие, лахары, крупнейший из которых промчался 18 км по долине реки Халактырки, уничтожив по пути широкую полосу березового леса.

Уникален лахар, возникший 30 марта 1956 г. при взрыве Безымянного, вулкана Ключевской группы. В долины Сухой Хапцы и соседних „сухих“ речек хлынул пирокластический поток, который, обладая большой энергией и взаимодействуя с ринувшимися отовсюду талыми водами, в дальнейшем пре-

вратился в грязекаменный. Поток прошел по долинам рек Сухой и Большой Хапицы до реки Камчатки 90-километровый путь и сформировал обширные поля селевых отложений, площадь которых только на участке от вулкана до русла Большой Хапицы составляет приблизительно 35 км². В результате исключительно бурного снеготаяния мощные сели сошли со склонов сопок Зиминных и Ключевской, после чего соединились с основным потоком. Общий объем перемещенной и отложенной лахарами массы по самым скромным оценкам достигает 0,5 млрд. м³.

Вершина Токати в одноименном хребте, возвышающемся в центре острова Хоккайдо, считавшаяся потухшим вулканом, внезапно пробудилась к жизни 24 мая 1926 г. Первое извержение с выбросом раскаленных газов и вулканических бомб началось в 12 ч 11 мин, тут же стал стремительно стаявать мощный снежный покров. Образовавшийся лахар спустился по северо-западному склону вулкана приблизительно на 4 км. Второе извержение достигло кульминации в 16 ч 18 мин, когда и образовался основной грязекаменный поток, устремившийся в реки Бизй и Фурано. Не менее 6—7 млн. м³ грязекаменной массы обрушилось в русло Фурано. Расстояние от кратера до железнодорожной станции Камифурано поток прошел за 25 мин, что отвечает средней скорости 13 м/с. По мере удаления от кратера с падением уклона поток растекался шире и скорость его уменьшилась.

Пункт	Расстояние от кратера, км	Расстояние между пунктами, км	Средняя скорость м/с
Кратер	0		
Контора Вонсан	2,4	2,4	40
Устье реки Кибидзэу	6,5	4,1	22
Выгон Синсэй	16,5	10,0	16
Железная дорога	20,5	4,0	7
Окраина Камифурано	23,1	2,6	3

Ширина лахара на высоте 800 м достигала 2 км. Максимальная глубина в узком ущелье на склонах вулкана была более 40 м, в зоне леса достигала 15 м, в районе выгона Синсэй — 10 м. Камни, переносимые потоком, были невелики, валуны более метра встречались единицами, а в нижней зоне отложенный обломки породы в основном не превышали сантиметра. Древесины вынес лахар около 57 тыс. м³.

Грязекаменный поток прошел через селение Камифурано, практически уничтожив его и покрыв отложениями 29 км². Погибло 144 человека.

На полуострове Симабара, южная оконечность острова Кюсю, образованном вулканом Ундзен, в 1792 г. разразилась

крупная селевая катастрофа. Ночью 21 мая, спустя шесть месяцев после начала извержения, взлетел на воздух боковой восточный конус Маюяма, в результате чего, несмотря на отсутствие снега и сильных ливней, образовался грандиозный лахар, принявший жертву — 9745 жизней. Источником вод, вероятно, были недра земли, что косвенно подтверждается фактом поднятия воды через трещины в породе. Грязекаменная масса, по-видимому, все же обводнилась слабо, так как скорость потока была незначительной: один житель вместе со своим домом преодолел километровое расстояние за целых 3,5 ч (0,1 м/с). В настоящее время во взрывном кратере на высоте 660—690 м над уровнем моря расположен известный курорт Ундзен, приуроченный к горячим источникам.

5 августа 1783 г. при извержении вулкана Асама (130 км к северо-западу от Токио) палящая лавина обрушилась на северное подножие вулкана и перегородила реку Агатума. Скопившаяся в течение часа вода и пирокластический материал образовали горячий лахар, прошедший 80 км и погубивший 1300 человек.

При выбросах пара из вулкана Бандай (1819 м), расположенного в срединном хребте острова Хонсю, в 200 км к северу от Токио, грязекаменные потоки формировались в 1806, 1808 и 1888 гг. Во время катастрофического извержения 1888 г. обрушилась стенка вулканического конуса — громадная масса породы, почти превращенная в глину под воздействием перегретого пара и насыщенная влагой, заимствованной у горных речек. Возникший 250-миллионнокубометровый лахар уничтожил 460 человек.

При извержении вулкана Хакусан (Годзен, 2702 м), находящегося в 110 км к северу от города Нагоя, возникли лахары, порожденные водами выброшенного кратерного озера.

Слово „лахар“ индонезийского происхождения. Грязекаменные потоки, время от времени опустошающие окрестности многочисленных на Малайском архипелаге вулканов, представляют собой стихийное природное явление, с которым местному населению приходится непрерывно соприкасаться.

Яванский вулкан Келуд (1731 м) с помощью своего кратерного озера за 100 лет породил 27 лахаров. Широко известные события, развернувшиеся при извержении в ночь с 19 на 20 мая 1919 г., когда 38 млн. м³ воды буквально вышвырнуло на склоны вулкана. Горячие лахары устремились в долину и покрыли грязекаменной массой 131 км², разрушив частично или полностью 104 селения. Стихия буйствовала каких-то 45 минут, но унесла за это время 5110 человеческих жизней. 16 км между точкой, расположенной ниже кратера на высоте около 450 м и городом Блитаром, поток преодолел за 15 минут, что соответствует средней скорости 18 м/с. В Блитаре глубина потока достигала 2,5 м.

В 20-километровой полосе, захваченной потоками, оказались Блитар и местность к северо-западу от него. Ширина

отдельных грязевых рек была более 4 км, длина — до 38 км. Объем отложений очень приближенно оценивается 40—100 млн. м³.

Для того чтобы предотвратить подобные катастрофы, голландские специалисты пробили серию туннелей, через которые озеро было спущено, поэтому во время извержения 1951 г. сформировались лишь небольшие лахары. Однако в 1966 г., когда входы в старые туннели разрушились, а строительство нового не было завершено и глубина кратера увеличились на 10 м, вновь разразилась катастрофа. Один из лахаров глубиной 25 м прошел 31 км и покрыл селевой массой 45 км².

В 1875 г. лахары на Келуде образовались не в связи с извержением, а в результате того, что обрушилась стенка кратера, подпруживавшая озеро.

В январе 1817 г. вулкан Кавах-Иджен на востоке Явы, изрыгнув 36 млн. м³ кислых вод, сформировал селевой поток, повлекший ужасные разрушения и гибель множества людей.

Вулкан Галунгунг на западе Явы (в 60 км к юго-востоку от Бандунга) в 1822 г. в течение 5 часов излил 30 млн. м³ кипящей грязи в русло реки, по которой поток прошел не менее 24 км, убил 4000 человек и оставил отложения камней и голубоватой грязи объемом 100 млн. м³.

Предполагается, что вулкан Раунг (3332 м), возвышающийся на восточной оконечности острова Ява, раньше также имел кратерное озеро, которое в 1638, 1730 и 1838 гг. породило грандиозные лахары, затапливавшие долину Рогодьямпи.

Лахары из кратерного озера возникли в 1898—1900 гг. при извержении вулкана Унауна, поднимающегося на 500 м из вод залива Томини или Горонтало, вклинившегося между двумя северными выступами острова Сулавеси (Целебес).

Ливни, случившиеся после извержений, образовали грязе-каменные потоки в 1963 г. на склонах вулкана Агунг (3142 м), что на острове Бали, и в 1951 г. на вулканах Ламингтон и Манам, расположенных на островах у северного побережья Новой Гвинеи. С Ламингтона потоки вязкой грязи двигались почти бесшумно.

С конуса вулкана Майон (2416 м) на юго-восточной оконечности острова Лусон (Филиппины), известного как самый симметричный вулкан мира, во время извержения 1968 г. с огромной скоростью (около 30 м/с) спускались палящие лавины, которые, смешиваясь с текущей водой, образовывали лахары.

После 200-летнего покоя пробудился к жизни Лассен-Пик (3181 м), один из вулканов в цепи Каскадных гор в северной части штата Калифорния. Кульминация извержения наступила 19 мая 1915 г. Лавовые потоки, растопив снег, вызвали лахары, продвинувшиеся по руслам Хэт-Крик и Лост-Крик до 50 км. Ширина одного из потоков колебалась от 200 до 800 м, глубина достигала 5 м. Глыбы до 6 м в диаметре были перемещены на 6 км.

11 октября 1963 г. произошло извержение из вулканического конуса Августин, возвышающегося на 1228 м над водами залива Кука у берегов Аляски. В результате стремительного перехода огромных снежных полей, раскинувшихся в кратере, в жидкое состояние образовались грязекаменные потоки, спустившиеся по северному и юго-западному склонам вулкана. Горячая грязекаменная масса объемом 15 млн. м³ покрыла относительно тонким слоем площадь 3 км².

Котопах (5896 м) — высочайший действующий вулкан мира, высящийся с юга над котловиной, на дне которой расположена столица Эквадора Кито, широко известен лахарами, возникающими при таянии льда и снега под воздействием раскаленных пирокластических и лавовых потоков. С 1532 по 1904 г. зафиксирован по меньшей мере 21 грязекаменный поток. Во время извержения 1877 г. лахары прорезали ледяной покров на склоне вулканического конуса до 50-метровой глубины и, спустившись по ущелью на равнину потоком шириной 60 м и глубиной 100 м, образовали громадное грязевое озеро. Основной селъ прошел 300 км (рекорд для лахаров!) со средней скоростью 7,5 м/с (максимальная достигала 14 м/с) и ухитрился нанести большой ущерб селению, расположенному в 240 км от вулкана.

Вулканы Эквадора всегда отличались высокой лахаропродуктивностью, но особенно они отличились в 17 столетии, когда породили великое множество селевых потоков. Последствия деятельности некоторых из них патер Самуэль Фритц, испанский пезунт, немец по происхождению, 40 лет проживавший на Амазонке, наблюдал в 1698 г. далеко внизу, на реке Мараньон.

1 февраля 1961 г. три грязекаменных потока, вызванные таянием льда и снега при извержении, сформировались на вулкане Кальбуко (2015 м), возвышающемся с юга над озером Льянкиуэ в северной части Патагонских Кордильер. Расход одного из потоков достиг 3000 м³/с.

Такие же лахары были отмечены в западной цепи Главной Кордильеры в южной части Центрального Чили на вулкане Вильяррика (2840 м).

В 16 в. лахары активно вмешались в политическую жизнь испанских колоний в Новом Свете. В сентябре 1541 г. только что основанная столица Гватемалы Сьюдад-Вьеха была разрушена громадным селевым потоком, порожденным при прорыве кратерного озера вулкана Агуа. Погибли 1300 человек, в том числе Донна Беатрис, первая женщина — глава правительства на континенте обеих Америк. В том же году недалеко был основан новый политический центр территории — город Антигуа, разрушенный, на этот раз землетрясением, в 1773 г.

Сильные ливни, выпавшие вскоре после извержения вулкана Фуэго (3918 м), соседа Агуа, вызвали лахары в сентябре 1963 г., а в 1971 и 1973 гг. здесь же прошли селевые потоки,

рожденные палящими лавинами, вошедшими в соприкосновение с речными водами.

С юго-западного склона вулкана Ирасу (3432 м) в Коста-Рико стекает река Ревентадо. В течение 240 лет в городе Картаго в результате ее разливов пять раз случались наводнения, паводок 1951 г. был последним и самым крупным (максимальный расход $226 \text{ м}^3/\text{с}$). В период с марта 1963 по март 1965 г. происходило извержение, и пепел, уничтожив растительность, покрыл склоны вулканического конуса. Первые же ливни сформировали селевые потоки, превысившие по своей величине паводок 1951 г. В 1963 г. таких грязевых паводков было 5, в 1964 г. — 19, в июне—июле 1965 г. — 10. Плотность грязевой массы достигала $1900 \text{ кг}/\text{м}^3$, грязь состояла на 60% из частиц менее 3 мм и на 10% — из частиц менее 0,003 мм. Перемещались 5-метровые глыбы, скорость потока достигала 10 м/с.

Вулканы Суфрнер (1234 м) на Сент-Винсенте и Мон-Пеле (1397 м) на Мартинике в 1902 г. были отмечены мощными катастрофами: была опустошена северная треть острова Сент-Винсент, а на острове Мартиника полностью разрушен процветавший город Сен-Пьер. Что касается селевых потоков, то 7 мая около 13 ч два мощных лахара, сформировавшихся при выбросе воды из кратерного озера вулкана Суфрнер, пронесли один на запад, другой на восток, в Карибское море, по руслам Валлибу и Рабака. В последнем поток горячей грязи достигал глубины 15 м. На Мон-Пеле 5 мая в одном из двух кратеров произошел взрыв, и воду из небольшого озерка Этан-Сек выбросило в верховья реки Ривьер-Бланш, по которой прокатилась волна черной грязи, залив сахарный завод, расположенный в устье реки. В следующие два дня во многих долинах прошли грязевые потоки, несмотря на то что существенных ливней не было. Взрыв вулкана, уничтоживший Сен-Пьер, произошел 8 мая в 7 ч 50 мин.

На ледниковом куполе Мирдальсйёкудль в Исландии во время извержения вулкана Катла (970 м) в 1918 г. максимальный расход паводка, обрушившегося на прибрежную равнину, был втрое больше, чем расход в устье Амазонки, составив 300—400 тыс. $\text{м}^3/\text{с}$, а общий объем излившихся водных масс превысил 6 км^3 ! Здесь случаются и менее значительные прорывы, например, короткий паводок в июне 1955 г. объемом 28 млн. м^3 . В тысячелетней истории Исландии известно 13 извержений вулкана Катла.

Вулканическое тепло, видимо, способствует накоплению талой воды в озере Гримсвётн на покровном леднике Ватнайёкудль. Прорывы этого озера бывают грандиозными (см. этюд 6).

Извержения выбрасывали воду из кратерного озера вулкана Руапеху (2797 м) на Северном острове Новой Зеландии в 1969, 1971 и 1975 гг. 24 апреля 1975 г. 1,5 млн. м^3 воды хлынуло из кратерного озера, образовав четыре лахара.

На вулканическом острове Уайт, находящемся в заливе Пленти у берегов Северного острова, в 1914 г. лахар образовался в результате обрушения стенки кратера.

На острове Десепшен у берегов Антарктиды извержение 1969 г. сопровождалось возникновением грязекаменных потоков.

15. УВИДЕТЬ И ИЗМЕРИТЬ

Отселе я вижу потоков рожденье
И первое грозных обвалов движенье.

Александр Сергеевич Пушкин. Кавказ

Я для того пошел пешком по скалам
И в руки взял дорожную клюку,
Чтобы внять лавинам и обвалам.

Иоганн Вольфганг Гете. Фауст
(пер. Б. Л. Пастернака)

Многие ли видели селевые потоки? Вообще-то многие, но если по отношению ко всему человечеству, то, может быть, всего лишь одна сотая процента. Или меньше. Если же человек живет или работает в горах, тогда он, скорее всего, рано или поздно столкнется с селом. Раз или два в жизни.

Ну а многие ли специалисты-селевики лицезрели живые грязекаменные потоки? Увы, совсем немногие. И почти всегда неожиданно, не будучи подготовленными к этому. И последний вопрос: кто наблюдал зарождение грязекаменных потоков непосредственно в селевых очагах и проводил измерения скоростей, глубин, расходов, плотности? Почти никто. Считанные единицы. Вот об этих людях и пойдет речь. Первым, к кому пришло понимание, что необходимо сжиться с объектом своего изучения, был Г. М. Беручашвили. Он организовал начиная с 1961 г. наблюдения за селевыми явлениями в бассейне реки Дуруджи, продолжающиеся и в настоящее время.

Непосредственно в селевом очаге Шави-Дуруджи, у впадения в нее ручья Патара-Дабалгори, он основал верхний лагерь. Дорога сюда лежит или по дну теснины, где необходимо буквально ползти по отшлифованным грязекаменными потоками скалам, или по узкой тропе, то набирающей, то сбрасывающей высоту среди букового леса, перевитого лианами. Сейчас людей и оборудование забрасывают в этот лагерь на вертолетах, а раньше исследователи имели только то, что могли принести с собой. Беручашвили с большой теплотой вспоминает о своих

помощниках в этой самоотверженной работе — В. Кокоришвили, Н. Чохели и многих других.

За 18 лет общения с Дуруджи Беручашвили и его товарищи измерили основные характеристики примерно 1200 больших и малых селевых потоков! Измерения грубые, но, что очень важно, многочисленные. Вот верхние пределы полученных цифр: расход 2300 м³/с, глубина 16 м, поверхностная скорость 26 м/с, плотность селевой массы 2320 кг/м³, скорость обратной волны в изливающимся ПСМ 14 м/с.

Не остались обойденными и очаги Тетри-Дуруджи: в июне—августе 1976 г. там были обмерены сотни потоков с расходами до 500 м³/с.

Запечатлены также картины формирования и движения селевых потоков — излияние ПСМ по типу опустошения водохранилища при мгновенном разрушении плотины, ламинарность режима течения грязекаменного потока с большим содержанием глины, более чем 10-метровые прыжки селя на порогах русла при ударах о скальные выступы.

Что касается звучания селя, то Беручашвили говорит: о грохоте у фронта потока, негромком утробном гуле и глуховатом шелесте при движении основного грязекаменного тела: «Крупный поток, когда смотришь ему вслед, напоминает удаляющийся железнодорожный состав. Это очень красиво,— заключил он, затем подумал и добавил: — Но очень опасно...»

Зимой 1965-66 г. сотрудников отдела селевых потоков Казахского НИГМИ посетила мысль о тщетности дальнейшей умозрительной деятельности по изучению селей. Хождение по следам прошедших потоков — дело хорошее, даже необходимое, но далеко не достаточное. Наше внимание привлекли расположенные вблизи Алма-Аты, на северном склоне Заилийского Алатау, очаги рассредоточенного селеобразования Кокчеки и Акжар. По слухам, селевые потоки там проходили при каждом заметном ливне. О селях Кокчеки мы знали также по отчетам и публикациям Г. К. Синявского, проводившего там наблюдения в 1948 г.

Когда „прошла зима тревоги нашей“, усилия отдела сосредоточились на Кокчеке — левом притоке Большой Алматинки, а выбранный нами очаг находится в бассейне левого притока Кокчеки. Этот бассейн имеет такие характеристики: общая площадь 0,214 км² (обнажений — 0,140, под лесом — 0,027, под лугами — 0,047), высотный диапазон 1420—1710 м, длина русла 587 м при среднем уклоне 0,207 (11°40'), средняя крутизна склонов в основном селевом очаге 43°. В последнем коренные породы — сиениты и розоватые граниты — выходят на поверхность в верхних и средних частях склонов, иссеченных глубокими бороздами, чередующимися со своеобразными „гривами“ из мелкозема.

Гранулометрический состав рыхлообломочного плаща, состоящего до сантиметров, но в отдельных гривах достигающего толщины нескольких метров, таково: обнажение глав-

ного кокчекинского очага, называемого в туристской среде почему-то Каменным цветком, нижней своей частью погружено в буйные заросли арчи, осины, яблони и урюка, пронзенные пирамидами тянь-шанских елей. На лугах, развитых на щебнистых и маломощных горных черноземах, обращают на себя внимание присы, чебрец, полынь, обширные шиповниковые розарии. Русло основного водотока проходит в коренных породах. Ранней весной оно завалено рыхлообломочным материалом и лавинным снегом. В нескольких десятках метров от устья нашего селевого водотока был сооружен прямоугольный селеметрический лоток, приуроченный к водопаду.

мм	<0,01	0,01-1	1-10	>10
%	5	35	40	20

Таковы внешние данные природной селевой лаборатории в бассейне реки Кокчеки. Сотрудники отдела селевых потоков, а впоследствии и алма-атинской селестоковой станции впервые наблюдали живые, хотя и небольших размеров, грязекаменные потоки именно на Кокчеке. Много добрых слов хочется сказать о таких кокчекинских сподвижниках, как Р. В. Хонин, А. Б. Дмитриев, Г. П. Беляков, но наше пятилетнее присутствие в Кокчеке в первую очередь связано с именем Т. Л. Киренской, селевика метеорологического происхождения. Вот как она рисует типичную ситуацию на Кокчеке во время ливня, когда, как говорят, хороший хозяин и собаку на двор не выгонит. Текст этот был как-то по моей просьбе между делом набросан Татьяной Леонидовной и передан мне в безраздельное владение. Поэтому, цитируя его, я позволил себе сделать кое-какие купюры и легкую правку, оставив, как мне кажется, без изменений оттенок чисто женского восприятия действительности.

«Дождь. Паводок нарастает. Вот-вот из-за поворота русла появится то, что с таким нетерпением ждут облаченные в нелепые брезентовые плащи люди. Дождь усилился и бешено колотит по промокшей земле, образуя селевые микропотоки прямо под ногами. Все взгляды обращены в сторону очага. Слышится отдаленный гул. Там, в 500 м от пункта наблюдений, очаг, насытившись водой, вдруг дрогнул и, словно освобождаясь от лишней тяжести, извергнул языки холодной грязекаменной лавы. Сейчас они ворвутся в русло, где, теснясь и толкаясь, сольются и помчатся дальше к ожидающим их людям, приборам, фотокамерам.

Первая волна грязекаменного потока прокладывает путь по руслу, теряя силы. Вот голова селя показалась перед лотком. К сожалению, она невелика и является лишь слабым отголоском страстей, бушевавших в очаге. Двигаясь фронтом во всю ширину русла, передний вал селя сплошь состоит из камней размером от 15 до 40 см, смазанных грязью. Они шевелятся, переворачиваются, спотыкаясь, налезая друг на друга, придавая селевому валу сходство с движущимся танком. Более крупные камни, составляя основное ядро, движутся в центре потока и быстрее остальных, более мелких, цепляющихся за

берега и остающихся на месте. Высота вала примерно равна диаметру самых крупных камней, а скорость его продвижения едва достигает 1 м/с. Сразу же за передовым валом содержание камней резко уменьшается, тело потока, значительно более жидкое, содержит камни небольших размеров (5—7 см). Поток уже не заполняет все русло, ширина и глубина его уже не превышают 1 и 0,2 м, зато скорость возрастает до 1,5—2 м/с. Кажется, что течет просто грязная вода, но взятая проба оказывается неожиданно тяжелой и представляет собой отнюдь не воду, а довольно густую (плотностью чуть ниже 2000 кг/м³) смесь из менее чем 5-сантиметровых камешков, песка и глины.

Поток затихает. Это ослаб дождь, стал моросящим. Если интенсивность его не увеличится, то селевых явлений в очаге больше не будет. В русле проходит иослеселевой паводок, прорезавший себе путь в свежих селевых отложениях. Теперь это на самом деле лишь очень мутная вода.

Но вот дождь снова усилился. Оживает и поток. На этот раз включение очага в „работу“ происходит быстрее, он уже встревожен и находится в неустойчивом состоянии. Идет сильный дождь интенсивностью 0,2—0,3 мм/мин. Нарастает гул, дрожит земля. Из-за поворота выскакивает селевой поток и в мгновение ока уже рушится вниз с лотка. Эта волна совсем не похожа на предыдущую, ее высота около метра, скорость 5 м/с. Очень густая масса, напоминающая цементный раствор, кажется почти однородной по составу, так как отдельные камни не различаются. Только при снижении скорости становится ясным, что камней в потоке очень много. Пронесются и крупные камни диаметром до 0,8 м. Они заметны хорошо, хотя в отдельные мгновения погружаются в поток, но потом снова оказываются на поверхности. Камни плывут, иногда разворачиваясь в горизонтальной плоскости, плывут медленнее основной массы потока. Общее уменьшение мощности потока связано с общим снижением интенсивности дождя, отдельные же пульсации ливня и потока друг с другом не связаны.

Снова усиливается дождь. Новая волна еще более мощная (высота 1,5 м, скорость 5 м/с). По составу она напоминает предыдущую».

В 1973 г. сотрудники селевой партии Управления гидрометслужбы Казахстана В. И. Шушарин и Я. Н. Марков указали на возможность прорыва одного из небольших моренных озер в бассейне реки Средний Талгар на северном склоне Запильского Алатау. Это настолько их заинтриговало, что в июле — августе 1973 и 1974 гг. они организовали на этом объекте некоторые наблюдения. Действительно, им удалось увидеть девять селевых потоков. Непосредственно наблюдались процессы опорожнения озера, поступления воды в селевой очаг, селеформирования, движения грязекаменного селя, его выхода на поле выноса. Были зафиксированы гидрографы опорожнения озера, измерены максимальные селевые расходы, составляющие баланса твердого и жидкого вещества, плотность селевой массы,

произведена киносъемка явления. Несмотря на то что многие измерения носили приближенный характер, а некоторые элементы и вовсе не измерялись, преуменьшить значение инициативы и энтузиазма казахстанских селевиков нельзя ни в коем случае.

Случалось так, что свидетелями разразившегося селевого явления оказывались не селевики, а специалисты совсем другого профиля. И честь и хвала тем из них, кто, понимая уникальность происходящего, пытался подручными средствами провести какие-либо измерения, объективизировать описания увиденного.

Так, например, 18 августа 1966 г. почвовед И. Н. Степанов, наблюдая грязекаменный поток на Кенколсае в Кураминском хребте (Западный Тянь-Шань), провел хронометраж прохождения селевых волн, измерил средние скорости потока на 130-метровом участке между двумя заметными скалами, составил толковое описание впечатлений. Он сделал даже попытку оценить количество осадков в центре ливня: если в районе лагеря экспедиции, где выпало 30 мм, почва промокла на 18 см, то простая пропорция дала результат — 90 мм.

Меня всегда удручала ситуация, когда ученые-селевики сводили свою деятельность к перетасовыванию давно известных фактов и повторению давно сказанного, а не к естественному, казалось бы, стремлению засучить рукава и измерять, измерять, измерять... В нашем деле очень важно, еще не привыкнув просиживать брюки в кабинетах и на заседаниях, вовремя сказать коллегам: „ухожу от вас я в горы“. Поэтому свой этюд мне хочется заключить словами Расула Гамзатова, обращая их и к уже маститым, но в первую очередь к молодым и будущим селевикам:

Мой друг, кончай пустые споры,
Смех прекрати, сотри слезу,
Быстрее поднимайся в горы,
Ты, суевающий вниз!

16. ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИСУТСТВИЯ

Такие опыты помогают экспериментатору составить общее представление о явлении, которое он изучает.

Д. Томсон. Дух науки

Уже было отмечено, что селевые потоки и их исследователи, особенно вооруженные необходимой измерительной техникой, встречались друг с другом слишком редко или вовсе не встречались. Приходилось бродить по следам прошедших потоков,

по следам катастроф. Приходилось предполагать, домысливать, прикидывать, искать аналогии в более известном... Отсюда — упрощения, ошибки, заблуждения. Ситуация поистине безотрадная. Где же выход?

Собственно говоря выход известен. Чуть ли не половину тысячелетия назад были высказаны слова: „...Хотя я и не умею так, как они, цитировать авторов, я буду цитировать гораздо более достойную вещь — опыт, наставника из наставников“. Это из Атлантического кодекса Леонардо да Винчи.

Итак, опыт, эксперимент. История развития селеведения не может похвастаться серьезными достижениями в этой области. К сожалению, основные исследования велись именно в рамках „цитирования авторов“. Тем не менее идея об активном эксперименте, о воссоздании селевого потока в природе, вероятно, достаточно стара.

В 1951—1955 гг. сотрудники Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института для того, чтобы экспериментально проверить пригодность существующих формул для расчета скорости потоков, в русле горного ручья Чимбулак под Алма-Атой воспроизводили кратковременные паводки. Объемы попусков не превышали 400 м³, а максимальные расходы паводков 10 м³/с. Незначительный уклон, а также то, что русло на экспериментальном участке проходило в коренных породах, обусловили слабое насыщение водного потока твердым материалом (плотность смеси воды и горной породы составляла 1100—1200 кг/м³). Авторы экспериментов И. П. Смирнов и С. П. Кавецкий полагали, что природа созданных ими паводков и катастрофических селей Занлийского Алатау одинакова.

С 1952 г. искусственные сели воспроизводил Г. В. Иванов на Северо-Байкальском нагорье для проходки геологоразведочных канав путем единовременных попусков воды по искусственным бороздам и траншеям, заложенным на достаточно крутых склонах. Уклон здесь составлял уже 10—30°, однако объем попусков и их продолжительность были невелики: до 40 м³ и до 10 с.

К недостаткам перечисленных экспериментов относятся незначительный уклон, пространственная и временная ограниченность развития процесса, искусственность „селевых очагов“.

В Казахском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте, в отделе селевых потоков, которым мне довелось руководить с августа 1964 по май 1978 г., зародилась идея воссоздать грязекаменный поток искусственно! Не в лаборатории. Не модель. Не подобие. Такой, каким он бывает в природе. Настоящий. В настоящем селевом очаге.

Р. В. Хонин, тщательно изучивший по аэрофотоснимкам возможные варианты, обратил внимание на крупный селевой врез, расположенный в верховьях реки Чемолган, в 50 км по прямой от Алма-Аты. Объект действительно оказался полностью приемлемым для наших целей.

Готовили и проводили первый эксперимент три летних сезона (1970—1972 гг.). Первый год посвятили оборудованию селетрических створов, геодезическим съемкам, трассировке и накатыванию грунтовых дорог, вернее тех путей, которые мы очень не любили показывать директору института и его заместителю по хозяйственной части. 7 июля 1971 г. началось сооружение плотины.

Селевой очаг, выше которого мы наметили создать плотину и водохранилище для осуществления попусков с необходимыми расходами и продолжительностью, представлял собой грандиозный врез, рассекающий уступ древней ледниковой морены; его длина 930 м, средняя ширина по верху 95 м и средняя глубина 45 м.

История создания селевого полигона, расположенного на высоте от 2500 до 3000 м над уровнем моря,— это три года неимоверных усилий всего отдела. Это тысячи передвинутых камней и глыб, сотни кубометров вырытого или перемещенного грунта и уложенного бетона, десятки тонн перенесенных на руках грузов. Это карабкающиеся по горным склонам или накрепко засевшие в грязи автомашины. Это жара и холод, бессонные ночи, дождь и снег, непрсыхающая одежда, недоставленное во время продовольствие. Это надежды и разочарования, бегство слабых, крепнущая дружба, подлинное становление отдела...

1972 год. В водохранилище накоплено 42 000 м³. Эксперимент назначен на 25 августа!

24 августа. Пешком, на автомашинах, вертолетах начали прибывать сотрудники института и многочисленные гости, в основном алма-атинцы, но были и москвичи, ленинградцы, киевляне, ташкентцы. Это селевники, гидрологи, геологи, метеорологи, гидротехники, географы, кинооператоры, корреспонденты. Появились некоторые члены селевой комиссии. Разбит „гостевой“ лагерь — целая улица палаток, столовая, медпункт.

К вечеру наполнили тучи, пошел снег, опустился туман...

25 и 26 августа. Приморозило. Ситуация удручающая. Все покрыто снегом, спрятано в тумане. Обстановка томительного ожидания. Некоторые гости торопливо отбыли. Внезапно стал падать уровень водохранилища: почти прекратилось таяние ледников, питающих его. Снарядили группу энтузиастов для спуска воды небольшого моренного озера, расположенного под самым гребнем хребта. Закат вечером 26 августа был красив необычайно.

27 августа. Утро было ясное и летнее. Снег стремительно исчезал... Всем стало ясно, что эксперимент состоится сегодня.

Алма-атинское радио прислало своего корреспондента В. Сову, который, как водится, с пристрастием опросил наших гостей. Вот некоторые ответы, характеризующие настроенные всеобщего ожидания и крайнего интереса к происходящему.

А. Н. Олиферов из Института минеральных ресурсов Министерства геологии Украины (Симферополь): „...Очень интересно впервые в жизни после 20 лет исследования селевых потоков по их следам увидеть настоящий селевой поток со всеми его особенностями“.

И. В. Боголюбова из Государственного гидрологического института (Ленинград), автор монографии о селевых потоках: „Видите ли, я очень долго изучала всякие материалы о селях, но ни разу мне не удавалось увидеть в натуре весь процесс движения селя. Но вот я уже жду этой встречи пять дней, и никак она не происходит, эта встреча“.

Л. П. Мазур из Казгипроводхоза (Алма-Ата): „Я очень долго работала на селестоковой станции и видела значительные паводки, а вот селя в натуре мне тоже не приходилось наблюдать. Поэтому мне очень интересно“.

Во время эксперимента В. Сова вел репортаж „С микрофоном у селевого потока“. Я не удерживаюсь здесь от искушения передать ему на время слово, так как о селе повествовал он с энтузиазмом любознательного и впечатлительного свидетеля:

„...Вертолет. Последний облет. Это тоже своего рода предупреждающий сигнал о том, что близится начало селевого потока. Тысячи кубометров воды сейчас, с минуты на минуту, обрушатся в ущелье. Тысячи кубометров воды!“

Первая красная ракета. Первая красная ракета! Сейчас, сейчас начнется эксперимент. Вторая ракета. Третья ракета! Начало эксперимента!

...Вот сейчас он уже перемешан с камнями. Он идет на встречу нам. Валуны, пыль, брызги! Это очень трудно передать словами. Всю эту картину нужно видеть. Нужно видеть, как мчится эта страшная волна воды и камня!

Вы извините меня, я немного задыхаюсь: мне пришлось спуститься вниз. Сейчас я стою над самым потоком. Над самым потоком! Тысячи камней несет вода с собой. Вот сейчас валун перевернулся, честное слово, ничуть не меньше большого МАЗа. Грязекаменная лавина, которой нет преграды. Десять, двадцать, тридцать тонн весит каждый, не меньше. Они идут сплошным потоком. Это темная-темная масса.

Вы слышали когда-нибудь, как режут и стонут горы? Послушайте сейчас. Да! Горы могут реветь и стонать. Если бы это был естественный поток, он бы принес очень много бедствий людям. Очень много! Даже дрожит земля под ногами. Дрожит под ногами земля! Я не знаю, может ли мой микрофон вам передать весь этот грохот, весь этот гвалт, который несется по ущелью, но я никогда не пожалею, что увидел это сумасшедшее зрелище. Честное слово, сумасшедшее. Вы уж извините меня, я не могу и некогда мне подбирать в этом хаосе нужные слова. Но, черт побери, это — надолго запоминающееся зрелище!

...И вот снова волна подо мной. В нескольких шагах от меня. Совсем в нескольких шагах! Вверху вертолет. Внизу все-

мирный потоп... Гудит встревоженная земля. А поток все движется и движется, и брызги обдают меня. Брызги селевого потока! Наверное, впервые записан этот шум на магнитофон, потому что селевой поток приходил к людям неожиданно-негладно, приходил как беда и горе, приходил как несчастье тысячам и тысячам людей. И впервые этот селевой поток ничего не может сделать людям, потому что его сделали люди.

...Я думаю, что никто из нас, из 150 человек, участвовавших в этом эксперименте, никто не пожалеет, что он провел 7 дней в горах. За это время здесь выпал дважды снег до 10 см, но он уже растаял, и снова над нами наше алма-атинское солнце и перистые облака. Прекраснейшая погода! И вместе с тем вот такое грязное марево, и страшное, мчитя сейчас по Чемолганскому ущелью“.

Вопрос к директору КазНИГМИ Ахмеджанову:

— Хаким Ахмеджанович! Ваше самое первое впечатление после селевого потока?

— Это был действительно селевой поток!

А. Н. Олиферов:

— Я в страшном восторге! Впервые в жизни я увидел настоящий селевой поток! Я очень рад, что прибыл в Алма-Ату, чтобы принять участие в этом эксперименте. Во время селя я был совершенно как пьяный, настолько был доволен, что увидел все это в натуре.

Итак, первый эксперимент закончен. Воспроизведение искусственных селей в естественных очагах — это реальность. Искусственность ситуации сказалась только в способе получения потока воды, поступившего в селевой очаг. В нашем случае этот поток был создан пуском воды из водохранилища. С таким же успехом он мог возникнуть в результате прорыва моренного озера или выпадения ливня на альпийские луга в пределах водосбора селевого очага. Сам же процесс формирования селя ни в какой мере не может быть признан отличным от такового без участия человека.

В результате эксперимента при ясном небе и в состоянии полной готовности к наблюдениям и измерениям более 150 человек впервые смогли увидеть процесс формирования и прохождения достаточно мощного селевого потока. Впервые же были получены четкие представления о соотношении твердого и жидкого вещества в селевом процессе, подтвердилось представление о возможности многократного превышения объема и максимального расхода сформированного грязекаменного потока над таковыми исходного водного. Особым достижением следует считать получение гидрографов потоков на входе в селевой очаг и на выходе из него, что стало возможным в результате использования разработанной под руководством Б. С. Степанова специальной селизмерительной аппаратуры.

Пуск воды из водохранилища был начат в 12 ч 15 мин (третья красная ракета! Как все это будет? и будет ли вооб-

ще?). Объем, продолжительность и максимальный расход пуска соответственно составили 12 тыс. м³, 18,5 мин и 16 м³/с. В очаге и нижележащем русле (до контрольного створа) была захвачена масса обломочной породы объемом 32 тыс. м³, объем селя оценен в 42 тыс. м³ (с учетом 4 тыс. м³ воды, содержащейся в ПСМ), средняя плотность — в 2070 кг/м³, а максимальный расход — в 110—120 м³/с.

На следующий год состоялся новый эксперимент. 22 августа в 13 ч вновь открылись ворота плотины, объем водохранилища в этот момент составлял 39 тыс. м³. Были сделаны четыре пуска с трехминутными перерывами. На этот раз ПСМ недосчитался 102 тыс. м³. Максимальная измеренная плотность селевой массы достигла 2300 кг/м³. Привожу „бухгалтерскую“ ведомость второго эксперимента.

Пуск			Селевой поток		
продолжительность, мин	объем, тыс. м ³	максимальный расход, м ³ /с	максимальный расход, м ³ /с	объем, тыс. м ³	средняя плотность, кг/м ³
2	2	16	100	63	2120
10	8	15	90		
9	6	12	70		
222	25	2	18	73	1970
—	41	—	—	136	2040

Новые идеи, новая аппаратура, новый эксперимент. Третий! 19 августа 1975 г. В водохранилище 60 тыс. м³. Были осуществлены два 6-минутных пуска с почти часовым перерывом между ними. Основные цифры таковы:

Пуск			Селевой поток		
продолжительность, мин	объем, тыс. м ³	максимальный расход, м ³ /с	максимальный расход, м ³ /с	объем, тыс. м ³	средняя плотность, кг/м ³
6	10	28	430	72	2160
6	5	15	320		

Последовательно прошли два коротких, но мощных селевых потока, причем второй, естественно, был сформирован при значительно более высоком увлажнении ПСМ (отсюда в основном и относительно высокое значение максимального селевого расхода).

Получена достаточно полная картина скорости селевого потока. Вот, например, как двигался по селевому врезу фронт водного потока, превращающегося в грязекаменный:

Расстояние от входа в очаг, м	Длина участка, м	Угол наклона участка, градусы	Скорость, м/с	Расстояние от входа в очаг, м	Длина участка, м	Угол наклона участка, градусы	Скорость, м/с
0				238	51	18	4,6
34	34	18	4,9	283	45	14	6,4
59	25	19	4,5	339	56	17	5,3
85	26	18	4,1	374	35	17	2,9
122	27	14	5,2	461	87	15	10,0
148	26	17	3,9	505	44	18	7,6
187	39	20	4,8	612	107	13	5,2

Всмотритесь в красоту цифр. Сколько информации кроется в этой, на первый взгляд, сухой последовательности чисел. Уклон растёт, а скорость падает... И наоборот. А ПСМ практически однороден. Так же не бывает! Но цифры — упрямая вещь, значит, есть моменты, скрытые от нас в хаосе селеформирования. Налицо пространственная пульсация скоростей, расходов, интенсивности захвата обломочной породы из ПСМ, присущая самому транспортно-сдвиговому селевому процессу.

Далее поток неся в скальном русле. Выше контрольного створа он проходил 174-метровый участок, наклоненный под углом 12°. Вот цифры, характеризующие высоту и скорость селевых валов:

Голова первого селя	6,5 м	9,8 м/с
1-я волна	2,5	6,4
2-я волна	2,5	6,3
3-я волна	2,6	6,1
Голова второго селя	5,5	8,0

Великолепен был передний вал второго потока: в авангарде колоссального нагромождения глыб словно таран мчался каменный блок, большая семиметровая ось которого совпадала с направлением движения потока.

В широкой долине реки Чемолган фронт потока, постепенно освобождающегося от крупных валунов и разжижающегося, имел среднюю скорость на верхнем 5-километровом участке (5—6°) 4,0 м/с, на нижнем 18-километровом (3—4°) 1,9 м/с.

8 ноября 1976 г. Четвертый эксперимент, малый. Максимальный расход попуска 5 м³/с, селя 45 м³/с.

17. ВЕРОЯТНОСТЬ, СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Математический язык удивительно хорошо приспособлен для формулирования физических законов. Это чудесный дар, который мы не понимаем и которого не заслуживаем.

Юджин Вигнер. Непостижимая эффективность математики в естественных науках

Написав уравнение, мы не отняли у потока жидкости ни его чарующей прелести, ни его таинственности, ни его поразительности.

Ричард Фейнман. Лекции по физике

Как часто выпадают дожди? Вопрос можно и усложнить: как часто выпадают дожди со слоем осадков больше 1 мм, больше 10 мм, больше 100 мм? Для того чтобы ответить на такой и подобные вопросы — а эти ответы очень нужны, — многие и многие годы на метеорологических станциях проводят наблюдения за дождями с помощью осадкомеров. На основании данных таких наблюдений уже можно ответить на поставленный вопрос. Ответом на него будет служить относительная доля числа дождей со слоем, скажем, более 100 мм к их общему числу. Тем самым мы определили частоту события, которая является оценкой его вероятности. Под событием в данном случае следует понимать факт выпадения дождя слоем более 100 мм. Естественно, что чем больше слой, тем меньше частота и вероятность такого дождя.

Оцененная описанным способом вероятность p_1 соответствует таковой среди совокупности всех случаев выпадения дождей, т. е. это вероятность того случая, что первый же выпавший (или выбранный наугад) дождь будет иметь слой, превышающий те самые 100 мм. Практический интерес представляет вероятность превышения 100-миллиметрового значения дождя, максимального из измеренных в течение года. В последнем случае иногда величину, обратную вероятности p_2 , трактуют как средний период повторяемости явления. Тогда вероятность 0,1 (или 10%) означает, что событие повторяется в среднем один раз в 10 лет, вероятность 0,01 — раз в 100 лет, 0,001 — раз в 1000 лет. Добавление слов „в среднем“ очень важно, так как выдающиеся события могут случиться буквально друг за другом, чтобы потом не появляться в течение двойного или тройного среднего периода повторяемости. Пересчет одной вероят-

ности в другую легко осуществляется с помощью дополнительной цифры — среднего годового числа событий, в нашем случае — числа дождливых дней m :

$$p_2 = 1 - (1 - p_1)^m.$$

Мы здесь вторглись в круг вопросов, которыми занимается математическая статистика. И вопрос: насколько сильно величины, вычисленные по данным наблюдений, могут уклониться от истинных, идеальных значений, составляет одну из основных ее проблем. Сама же математическая статистика построена на основе теории вероятностей как точной математической науки, имеющей свою аксиоматику.

Вернемся к нашим осадкам. Напрашивается целесообразность построить кривую, связывающую величину слоя осадков с частотой их появления. Такие кривые — их удобно для каждой вычисленной пары величин обозначать на графике точками — носят название эмпирических кривых распределения. Тем же самым, чем вероятность является для частоты, для эмпирической кривой служит истинная кривая распределения. Последнюю пытаются отобразить теоретической кривой, которая отличается тем, что имеет свое аналитическое выражение (функцию распределения), и поэтому представляет собой плавную линию, в то время как эмпирические точки располагаются на графике гораздо менее упорядоченно. Причем эта неупорядоченность тем меньше, чем больше число зафиксированных случаев выпадения дождя, или, как говорят, чем длиннее ряд наблюдений, или чем больше объем выборки. Возникает задача сглаживания, т. е. проведение теоретической кривой распределения таким образом, чтобы эмпирические точки лежали возле нее как можно ближе.

Точно таким же образом изучают статистику и других величин — продолжительности дождей, температуры воздуха, расходов воды в реках. Было бы замечательно так же поступить и с характеристиками селевых потоков (объемом, максимальным расходом, плотностью). Но, увы, мы полностью лишены такой возможности, ибо за селями вообще никто никогда не вел систематических инструментальных наблюдений. Так уж сложилось исторически, но по вполне понятным причинам: всегда отсутствовали приборы и способы измерения и уж больно редко сели случаются на одном и том же водотоке, а для полноценных выводов наблюдать за ними пришлось бы многие сотни и даже тысячи лет.

Тем не менее для нужд строительного проектирования необходимы именно кривые распределения характеристик селей. Хотя бы приближенные, но необходимы. Есть единственный выход из создавшегося положения. Если известно, что селевые потоки возникают в селевых очагах при выпадении особо интенсивных ливней, а статистика последних в нашем распоряжении имеется, то напрашивается возможность характеристики селей

рассчитать, а их вероятность оценить по данным о дождях, которыми они обусловлены. Такие расчеты возможны, если разработаны математические модели селевых процессов.

Любой природный объект или процесс можно отобразить моделью. Будем этот объект или этот процесс называть оригиналом, прообразом, прототипом. Тогда модель — это нечто, в чем-то соответствующее оригиналу, отображающее его какими-либо средствами. Туманно? Ничуть! Конкретность придет вместе с определением модели. Если задуматься, то становится очевидным, что мы живем не только среди предметов и явлений, но и среди моделей.

Каждая модель должна в чем-то соответствовать оригиналу, а в целом комплекс моделей составляет то представление о предмете рассуждения, какое человек только может иметь. Модель кроме ее автора может быть воспринята любым посторонним лицом. Познакомившись с моделью, мы приобретаем какую-то информацию и об оригинале, поэтому модель тем лучше, тем ценнее, чем она ближе к оригиналу. Перечислю возможные типы моделей: мысленные, словесные, графические, вещественные, аналоговые, математические, модели литературы и искусства. Может быть, возможны и иные типы моделей, так как здесь я не претендую на полноту анализа.

Мысленные модели. Каждый специалист или даже человек случайный, увидел ли он движущийся поток, наблюдал ли его зарождение, ходил ли по следам прошедших селей, волей или неволей создает такие модели.

Словесные модели, т. е. описания каких-либо выявленных закономерностей, представлений, умозаключений, выводов, можно найти в многочисленных статьях, посвященных природе селевых потоков.

Графические модели. Это всякого рода зарисовки, гипотетические разрезы тела грязекаменного потока, логические схемы, блоки-диаграммы, призванные отобразить, как и словесные модели, как-нибудь подмеченные особенности движения селей или их классификационные признаки.

Вещественные модели. К ним можно отнести лотки или искусственные русла, в которых заставляют воду переносить наносы или грязь двигаться, разного рода вискозиметры (приборы, в которых для селевой массы получают зависимости между приложенными напряжением и скоростью деформации, так называемые реологические кривые, или кривые течения), малые и большие искусственные селевые потоки.

Аналоговой моделью селевого явления способна послужить какая-либо электронная схема, построенная (транзисторы, емкости, сопротивления) таким образом, чтобы электрические процессы в этой схеме в чем-то уподобились селевым (описывались бы теми же уравнениями). С помощью таких аналоговых электронных моделирующих машин, которые иногда применяются в гидрологии, в принципе можно было бы решать задачи некоторого определенного класса. Фактическая реали-

зация такой возможности мне не известна. Механические модели сложных реологических (текучих) тел, динамическое поведение которых отображают с помощью последовательного и параллельного соединения элементов сухого трения, упругих пружин и поршней в трубках, заполненных вязкой жидкостью, и графическое изображение которых можно найти в каждом учебнике по реологии, также являются аналоговыми. Кто-то когда-то в моем присутствии предложил считать моделью вязкого грязевого потока дождевую каплю, стекающую по оконному стеклу. Я бы классифицировал такую модель как вещественную и аналоговую одновременно.

Модели литературы и искусства. В совместной биографии выдающихся писателей, поэтов, композиторов, художников всех времен и народов почти нельзя найти факты их непосредственного соприкосновения с селевыми явлениями. Касался этой проблемы А. С. Пушкин в своем „Путешествии в Арзрум“; в одном из этюдов приведен отрывок из рассказа Мультатули „Банджир“, полный восторженного трепета перед стихией; нечто „селевое“ угадывается на известной картине Ф. А. Васильева „В Крымских горах“. Что же касается музыки, то я не знаю ни симфонических поэм, ни других музыкальных форм, посвященных селевым потоком, хотя в „Альпийской симфонии“ Р. Штрауса или в поэме „Что слышно в горах“ Ф. Листа селевая проблема явно затронута.

Математические модели. Приходилось слышать утверждения, что модели природных явлений должны быть не математическими, а физическими, ибо при их анализе необходимо исходить из физики явления. Но с этой точки зрения все перечисленные типы моделей — физические. Создавая любую модель, мы не должны (да и не смогли бы) забывать физическую сущность оригинала. Определение „математические“ используется не потому, что эти модели принадлежат математике и не имеют отношения к физике, гидрологии, геологии, селеведению, а лишь в силу того, что описание процесса производится с помощью математической логики, математической символики и математических правил.

Для удобства математические модели по разным признакам можно разделить на описательные, преобразования и составные; одномерные и многомерные; детерминированные, стохастические и смешанные.

Описательные модели в компактной форме констатируют и систематизируют информацию о том или ином объекте, явлении или процессе. Модели преобразования, как явствует из самого названия, призваны один вид количественной информации, имеющейся в нашем распоряжении, пересчитать в другой, интересующий нас по тем или иным причинам. Составные модели объединяют первые и вторые.

Простейшие одномерные модели описывают природные процессы, зависящие только от времени или какого-либо другого единственного аргумента. Более сложные многомерные модели

ориентированы уже не только во времени, но и в пространстве. Возможны и другие варианты аргументов, а не только пространственно-временные координаты.

Детерминированные модели, отображая конкретные физические, в нашем случае селевые, процессы, позволяют при наличии исходной информации об определяющих факторах (величинах, функциях) получить конкретные и единственные решения — числовые значения интересующих нас показателей. Стохастические модели описывают общие закономерности массового поведения случайных величин или случайных функций независимо от их конкретной физической природы (но с некоторой ориентацией на нее), дают представление об их средних значениях, отклонениях, повторяемости, изменчивости, взаимозависимости. Синтез детерминированных и стохастических моделей приводит к смешанным моделям.

Упомянутая выше аналитическая функция распределения слоя осадков — описательная одномерная стохастическая модель. Рассмотренные в этюде 9 модели селевых процессов являются детерминированными моделями преобразования, сдвигового и транспортного процессов — одномерными, а транспортно-сдвигового — двумерной. А вот для решения задачи построения кривой распределения, скажем, объема селевых выносов из конкретного очага взаимодействия, должна быть построена составная многомерная смешанная модель.

Вспомним, что рассуждения о моделях мы начали с постановки более сложной задачи, а именно с расчета кривых распределения характеристик селей на основании информации о повторяемости осадков. Рассмотрим такую ситуацию: дождь выпадает на водосбор, где формируется поверхностный сток и откуда водный поток поступает в селевой очаг, где в результате всего этого образуется грязекаменный поток. Требуется получить кривую распределения объемов селевых потоков, формирующихся в этом очаге. Нам приходится иметь дело с такой последовательностью объектов и процессов:



Моделирование селей начинается с моделирования ливней. С помощью ЭВМ создается, или, как говорят, генерируется, последовательность характеристик дождя (слой, продолжительность) с такой их повторяемостью, с какой они совместно появляются в природе. Далеко не все пары цифр, отвечающие

слою и продолжительности осадков, способны создать селевой поток. Подавляющее большинство таких „ дождей “ выпадает зря. Но вот — первый случай, подсчитываются объем, плотность, максимальный расход селя. Потом второй, третий... Таким образом, в потоке пар чисел (на самом деле их несколько больше) время от времени появляются случаи, отмеченные тем или иным значением селевого расхода. Такое подражание природе обычно называют методом или принципом статистических испытаний, или Монте-Карло. Ассоциация с игральными костями или рулеткой налицо.

Действительно, сидя за столом или, точнее, за пультом ЭВМ, мы разыгрываем последовательности и совокупности чисел, которым приписываем различный смысл: это либо количество или продолжительность осадков, либо длительность бездождных промежутков времени, либо величины объемов и расходов водных или селевых потоков. В конечном счете мы получаем возможность построить кривую распределения интересующей нас характеристики селевого потока.

18. РАЗМЫШЛЕНИЯ О ПРОГНОЗЕ СЕЛЕОПАСНОЙ ПОГОДЫ И СЕЛЕОПАСНОСТИ

Мне думается, что из всего глупейшего, раздражающего вздора, которым забивают нам голову, едва ли не самое гнусное — это мошенничество, обычно называемое предсказанием погоды.

Джером К. Джером. Трое в лодке

Что такое прогноз? В словаре русского языка С. И. Ожегова находим: „Заключение о предстоящем развитии и исходе чего-нибудь...“. В данном случае мы говорим о прогнозе стихийного природного явления. В полной мере — это предвидение места и времени события и размера явления. Возникает интересный вопрос: имеет ли смысл прогноз только места события, без даты? Или наоборот, только срока, но без адреса? Очевидно, нет. Очевидно? Не для всех.

Общественность, научная и административная, в последнее время придает большое значение решению наиболее актуальных вопросов проблемы селей. И среди первостепенных задач, требующих быстрее решения и сосредоточения сил и средств, всегда называют прогноз. Прогноз? Это, очевидно, нужно, важно! Но исторически сложилось так, что изучение селей в основном носило, я бы сказал, несколько картографи-

ческий уклон. Составлялись разномасштабные карты страны, территорий, районов, бассейнов, вмещающие разнообразную информацию о селях, а иногда и не содержащие таковой. Объясняется все очень просто: составлять карты мы умеем, и нет никаких препятствий для их дальнейшего составления. Поэтому когда звучит призыв усилить исследования селевых потоков, то многие селевики это воспринимают буквально как: «За дело, господа, за карты!». Ну ладно, в конце концов некоторые карты для селеведения и необходимы, но карты селеопасности горных территорий с легкой руки С. М. Флейшмана были вдруг объявлены результатом прогноза. И термин предложен: „пространственное прогнозирование селей“. Нанести на карту селевой очаг — это то же самое, что оконтурить на этой же карте бассейн реки. И утверждать, что тем самым совершено прогнозирование селя столь же нелепо, как и полагать, что дан гидрологический прогноз.

Видимо, что-то подобное наметилось и в сейсмологии, так как известный австралийский ученый Ф. Стейси в своей „Физике Земли“ вынужден был специально подчеркнуть следующее: „Установленный факт, что сильнейшие землетрясения продолжают происходить в известных сейсмических поясах, а не повсюду, служит основой для общих мер предосторожности и не является частью прогноза землетрясений“. Так и в селеведении: представление о селеопасности территории не является прогнозом селей.

Пусть меня не воспримут как отрицателя необходимости селевого картирования. Ведь существуют же насущные задачи селеведения и вне сферы прогноза.

А вот еще один объект раздумий: сверхдолгосрочный прогноз селей. Известно, что практически все природные явления во времени распределены не равномерно, а группируются, т. е. имеют скопления и разрежения. Проявляется то, что называют цикличностью. Могут наблюдаться годы общего похолодания или, наоборот, потепления, периоды продвижения ледников вниз сменяются периодами их отступления, многоводные группы лет чередуются с маловодными. Естественно, что существуют и периоды с повышенной и пониженной интенсивностью селевой деятельности. Если последовательность, составленную из годового числа селей, прошедших в пределах некоторой территории, изобразить графически, то такая цикличность проявится достаточно четко. И конечно, цикличность селеактивности похожа на цикличность активности солнечной так же, как похожа на нее цикличность водности рек, засух и неурожаев, эпидемий, ледовитости океанов. Попытка использовать сходство кривых хода солнечной активности и частоты природных явлений во времени на первый взгляд представляется естественной. Это та ловушка, в которую попали многие блестящие умы, так и не сумевшие преодолеть нахлынувшие со всех сторон трудности. И тем не менее в этих циклах какая-то упорядоченность все-таки присутствует и идея сверхдолгосрочного

прогноза для новичков продолжает сохранять свою привлекательность. Из селевиков ей в последнее время отдает должное А. И. Шеко из Всесоюзного НИИ гидрогеологии и инженерной геологии.

Связи очевидны, иногда просто великолепны, но... неустойчивы. Все-таки популярность идеи построения сверхдолгосрочных прогнозов природных явлений непостижима. Меня всегда мучил вопрос, а не действует ли здесь идеология притчи о Ходже Насретдине, который рассчитывал, что за 20 лет или он умрет, или эмир, или наконец ишак?

А какова польза от сверхдолгосрочного прогноза? Допустим, что в 1980 г. объявят, что период 1987—1989 гг. будет отмечен повышенной селеопасностью. Вероятно, это полезно. Такую информацию можно учесть при планировании.

Поскольку солнечная активность влияет на селевые процессы лишь косвенно, через метеорологию, то, может быть, пусть метеорологи и изучают „земное эхо солнечных бурь“? Селевики же вполне могут обойтись сверхдолгосрочным метеорологическим прогнозом, делая на его основании свои выводы. Если, например, в тот же период 1987—1989 гг. ожидается „великая сушь“, то следует рассчитывать на интенсификацию гляциально-селевых явлений. Что же касается ливневых селей, то тут бабушка еще надвое сказала: селей-то будет поменьше, ну а если они сами будут побольше? Наверняка следует предположить десяток мелких селей одной единственной катастрофе.

Есть и еще один довод в пользу метеорологов, а не селевиков. Первые обладают надежными, а иногда и длительными рядами наблюдений, а у селевиков, увы, таких рядов нет, так как селевая статистика пополнялась от случая к случаю. Я наблюдал даже чисто детерминированную зависимость числа зарегистрированных селей от штатного расписания селевой партии.

Теперь, когда мы, отбросив с дороги псевдопрогностические наслоения, остались один на один с проблемой прогноза селей, наше положение продолжает оставаться тяжелым.

Ни один раздел селеведения не находится в такой рабской зависимости от смежных наук, как прогноз селеопасности. Действительно, мы, селевики, можем приблизительно рассчитать характеристики селевого потока по конкретной плювиограмме или хотя бы по средней интенсивности и продолжительности ливня. Но это годится лишь для селей прошлого. А как насчет будущего? В селерасчетном плане почти ничего не меняется, но необходим количественный прогноз осадков.

Помнится, какой-то умник сказал, что методику прогноза селей нужно разрабатывать в обход прогноза дождя. Но ведь тогда, решая обратную задачу, мы могли бы по селям прогнозировать осадки! Итак, для того чтобы дать количественный прогноз селеопасности, необходим прогноз интенсивности и продолжительности ливня. А как обстоит дело с этим вопросом? Пока очень плохо.

Самое печальное, что никто не хочет заниматься разработкой методов количественного прогноза осадков, как делом архитрудным и почти безнадежным. Один из крупнейших физиков современности нобелевский лауреат Р. Фейнман честно признал: „...Существует физическая проблема, общая многим наукам, очень старая к тому же, но до сего времени не решенная. Это не проблема поиска новых элементарных частиц, нет, это другой вопрос — вопрос давно, свыше ста лет назад, оставленный наукой в сторону. Ни один физик еще не смог математически безупречно проанализировать его, несмотря на его важность для сопредельных наук. Это — анализ циркуляции или вихревой жидкости... Мы не умеем прогнозировать погоду“.

Действительно, дело с прогнозом погоды обстоит неважно, а уж с количественным прогнозом ливней просто отвратительно. Однако, с моей точки зрения, все-таки имеется один еще не использованный шанс.

Метеорологи почему-то не пытаются прогнозировать продолжительность и интенсивность ливня уже начавшегося, уже идущего. Многие неопределенности, сводящие на нет заблаговременный (24 или 12 ч) прогноз, уже исчезли, их заменила вполне конкретная ситуация. Вы скажете, что поздно уже копаться с прогнозом. Отнюдь нет. Если радиоосадкомер или метеорологический локатор дает непрерывную информацию непосредственно на ЭВМ, готовую эту информацию воспринять и преломить в селевой прогноз, то значение такого варианта трудно переоценить.

Что можно противопоставить такому „сверхкраткосрочному“ прогнозу? Только сигнал службы оповещения о прохождении уже сформировавшегося селя в какой-либо точке бассейна, пусть даже сразу ниже селевого очага. Сколько времени у нас есть в запасе? Для объектов, которые первыми войдут в соприкосновение с селом, это время исчисляется минутами, иногда первыми десятками минут. Ну а если заблаговременность предупреждения увеличить еще на 20—40 минут? В большинстве случаев этого достаточно, чтобы избежать жертв и спасти то, что можно убрать из опасной зоны за полчаса-час.

Мне думается, что если в ближайшем будущем и можно рассчитывать на серьезный прогноз ливневых селей, то именно на такой.

Оптимистичнее следовало бы относиться к прогнозу гляциальных селей. Катастрофа здесь подготавливается исподволь, поэтому скрытая угроза может быть разгадана. Однако практически это осуществить очень сложно, ибо информация об объектах, расположенных в столь труднодоступной зоне, как высокогорье, почти всегда отсутствует.

В случае озер, подпруженных ледниками, проблема прогноза неразрывно связана с возможностью своевременного получения информации (паземной, аэровизуальной, аэрофотосъемочной, спутниковой) о возникновении и росте озер. Сам факт

подпруживания ледником озера является первым прогностическим сигналом о возникшей опасности. Краткосрочный (за несколько дней) и достаточно точный прогноз величины и времени прохождения пика прорывного паводка можно дать сразу же после того, как начался пока еще безобидный спуск озера, с помощью модели, описанной в этюде 6.

Прорыв моренных озер прогнозировать труднее. В этом случае важно оценить прочность моренной плотины или даже озерного ложа в целом. В качестве основы для долгосрочного прогноза служит график изменения максимального годового объема озера. Действительно, наличие постоянного ускорения роста объема озера свидетельствует о том, что вскоре можно ожидать самого худшего. Уточнение такого прогноза логично связать с продолжительным усилением притока тепла к морене.

Значительно сложнее обстоит дело, когда талые воды накапливаются во внутриглетчерных полостях. Непосредственно следить за разворачиванием событий в этом случае невозможно. Поэтому метод прогноза должен строиться на косвенных признаках. Все зависит от длительности и интенсивности процесса задержания воды. Имеет место утешительное обстоятельство: чем большую часть воды удержит ледник (т. е. чем катастрофичнее будет прорыв), тем заметнее это скажется на режиме стока питаемой ледником реки. При обнаружении сухого русла или жалкого ручья вместо обычного полноводного потока, когда погодные условия, казалось, не должны бы были привести к подобному положению вещей, следует иметь в виду возможность немедленной катастрофы. Именно этот тривиальный факт и может быть положен в основу прогноза. Сравнение расходов двух или нескольких ледниковых водотоков выявляет аномальные отклонения в стоке на одном из них. Метод „работает“ тем надежнее, чем больше талой воды накопилось во внутриледниковых пустотах, поэтому его нельзя использовать для обоснования полного отсутствия селеопасности.

Дополнительную уверенность при составлении прогноза селеопасности может дать метод, имеющий те же физические предпосылки, что и описанный. Этот метод основан на анализе хода хронологической линии в системе координат расход — температура воздуха. Сильным дополнительным аргументом заключения о степени селеопасности является прогноз температуры и высоты нулевой изотермы.

19. УГРОЗА ТРЕБУЕТ ОТВЕТА

...Лучшее, на что можно надеяться в будущем,— это стройная система активного предупреждения...

Бернард Глемзер. Человек против рака

Известный швейцарский геолог, большой знаток Альп А. Гейм с волнением говорил: „Бегство, своевременное бегство от таких природных явлений — не малодушие. Сопротивляться им — тупоумие или безумие. Спастись бегством вовремя и в нужном направлении и лучше сделать сто шагов лишних, чем не добежать на один шаг, и потерять лишние дни или недели, чем опоздать на одну минуту!» С рекомендацией Гейма нельзя не согласиться, если речь идет об отдельных людях, оказавшихся на пути селевого потока, но общество в целом уже не может позволить себе не сопротивляться.

Попытки предотвратить селевые катастрофы восходят к глубокой древности. Как и во многом другом, эти страницы истории имеют примеры, когда движущей силой были и глупость, и разум. Вот несколько примеров „действенных“ мероприятий, проводившихся с единственной целью — покончить с селеопасностью. Альпы, 1607 г., на озере Рюитор возводятся часовня; 1677 г., на озере Айсее у ледника Фернагт сжигают бродягу, подозреваемого в гляциально-селевом колдовстве; 1718 г., у ледника Гургль, который образовал озеро, угрожавшее долине Ланг в Эцтальских Альпах, организован крестный ход.

В то же время, еще в 1594—1597 гг., был предложен проект удаления воды из того же озера Рюитор с помощью туннеля, пробитого в скалах. А в Циллертале (Тироль) в 1640 г. было воздвигнуто одно из самых старых противоселевых сооружений — плотина Deier Ache, обошедшаяся в 30 тысяч флоринов. Эта каменная дамба высотой от 3 до 6 м, длиной 230 м и шириной в верхней части 2—4 м еще и сегодня защищает Целль от селей Герлосбаха.

Селеопасность существует лишь постольку, поскольку человек стремится использовать земли, подверженные воздействию селевых потоков. Поэтому освоение гор должно сопровождаться рациональными профилактическими мерами, которые можно подразделить на три основные категории: оповещение, активные воздействия на селевые процессы, пассивная защита от сформированных селевых потоков.

Цель оповещения — исключить жертвы и максимально снизить материальный ущерб от селей, предотвращение которых невозможно или нерентабельно. Население и предприятия предупреждаются о селеопасности почти везде, где это необходимо. Сама идея оповещения очень стара, и людям, живущим

в горах, она представляется естественной. Долгое время „служба предупреждения о селевой опасности“ организовывалась на местах по принципу „спасение утопающих — дело рук самих утопающих“. Случаи оправданного слежения за опасными объектами неоднократно имели место в Альпах, на Кавказе, в горах Средней Азии, в Каракоруме, Исландии. Сейчас настало время организации надежной автоматической системы оповещения о селевой угрозе с соответствующими каналами связи. Первая попытка такого рода принадлежит Государственному гидрологическому институту, где в 1964 г. был создан автоматический радиооповеститель селя (РОС). Датчиком установок служит трос, заключенный в стальную трубу и протянутый поперек русла. При разрыве троса потоком в эфир идет радиосигнал. К сожалению, РОС не давал сведений о размерах явления и переставал действовать после уничтожения датчика. Сейсмическая система оповещения о селевой опасности, разработанная СКБ опытно-экспериментального завода геофизических приборов, успешно испытанная на Чемолганском селевом полигоне в 1976—1978 гг., свободна от этих недостатков. Аппаратура различает сигнал, возбуждаемый селевым потоком, среди других, вызванных землетрясением или другими посторонними причинами.

Наиболее перспективны активные воздействия на селевые процессы. Здесь открываются следующие возможности:

- мелиорация водосборов

 - задернение и облесение склонов,

 - создание нагорных канав, валов, запруд, призванных задерживать ливневые воды на склонах;

- мелиорация ледниково-моренного комплекса

 - капитальная мелиорация, приводящая к невозможности образования водоема в данном конкретном месте, аварийная мелиорация, ликвидирующая непосредственную угрозу со стороны уже существующего водоема при чрезвычайных обстоятельствах;

- спуск кратерных озер;

- мелиорация селевых очагов

 - мелиорация очагов обводнения

 - дренаж и перехват вод для снижения обводненности ПСМ,

 - укрепление ПСМ;

 - мелиорация очагов взаимодействия:

 - отвод, полный или частичный, водного потока, стабилизация ПСМ.

Большинство мероприятий очевидно и не требует пояснений. Отмечу только, что из перечисленных приемов популярностью пользуются облесение и стабилизация ПСМ с помощью систем запруд из каменной кладки, монолитных железобетонных и сквозных, т. е. решетчатых, металлических или железобетонных.

бетонных конструкций. Такая система, стабилизирующая ПСМ на всем его протяжении, препятствует развитию транспортно-сдвигового селевого процесса.

Для защиты от селевых потоков возводят высокие и массивные одиночные плотины, верхние бьефы которых служат селехранилищами. Иногда, если это удобнее, строят каскады плотин с небольшими, но многочисленными емкостями.

Из интересных примеров селезащиты могу назвать следующие.

Австрийская провинция Тироль. На площади 12 650 км² живет около полумиллиона человек. Населенные пункты и коммуникации находятся под постоянной угрозой грязекаменной атаки из 627 селевых жерл разного калибра. Систематическая селезащита ведется здесь с 1884 г., но особо интенсивно после второй мировой войны. В результате к настоящему времени сооружены 10 927 поперечных заграждений в 605 селевых руслах, на 69 км укреплено дно водотоков и на 120 км укреплены берега, построено 40,5 км дренажных водоотводов, 287 селехранилищ, 200 км специальных дорог, на площади 13,5 км² произведено высокогорное облесение. 10-летняя программа селезащиты Тироля (1973—1982 гг.) предполагает затраты 1,2 млрд. шиллингов (60 млн. долларов).

Город Алма-Ата. Уникальной взрывной плотиной, воздвигнутой на Малой Алматинке в урочище Медео в 1967 г., был задержан катастрофический гляциальный селевой поток 1973 г. объемом 3,8 млн. м³. Поскольку большая часть первоначальной емкости селехранилища оказалась заполненной, производилось дальнейшее наращивание плотины. В 1977 г. объем тела плотины был 8,5 млн. м³, высота плотины составила 150 м, емкость селехранилища 12,6 млн. м³. В настоящее время строится плотина на Большой Алматинке. Затраты на селезащиту города Алма-Аты определены в 124 млн. рублей.

В последние годы много малых селехранилищ построено на пути наносоводных потоков, сбрасываемых с адыров в Ферганской долине, главным образом с Андижанских. В районе последних число селехранилищ превысило 60.

Грандиозная система селезащитных сооружений создана в районе города Лос-Анджелеса. Здесь на площади 7200 км² построено 19 плотин, 72 селехранилища, 630 км селеотводящих канализованных русел, 1930 км дренажных водоотводов. Стоимость системы около миллиарда долларов.

Помимо Советского Союза, Соединенных Штатов и Австрии странами активной селезащиты являются также Франция, Швейцария, Италия, Япония, Югославия.

Говоря о селезащите, нельзя не упомянуть об одной негативной стороне этой проблемы. Давно известен, но всегда актуален, тезис: лучше отсутствие плотин, чем плохие плотины. История селезащиты знает много примеров этому. Активно вмешиваться в природные процессы следует, когда понятна сущность этих процессов. В противном случае благие намере-

ния легко превращаются в свою противоположность, а последствия могут стать губительными.

Очень ответствен, например, спуск моренных озер. Главная задача при этом не столько опорожнить водоем, сколько сохранить моренную дамбу в мерзлом состоянии. Поэтому совершенно недопустима проходка дренажного канала путем размыва моренных отложений, достигаемого последовательными попусками накопленной воды, так как при этом мерзлая порода постепенно протанвает и становится неизбежным неуправляемый прорыв озера. Так, например, образовался грязекаменный поток 1977 г. на реке Кумбель, притоке Большой Алматинки.

Приведу здесь слова известного вулканолога Г. Тазиева, слова, удивительно точно характеризующие ситуацию, которая иногда возникает: „В этой области науки, где настоящих специалистов еще крайне мало, широкая публика, включая власти разного калибра, совершенно некомпетентна по той простой причине, что об этом грозном явлении природы пока собрано мало сведений. Посему трудно, а подчас невозможно, отвергать даже заведомо ложные мнения. И псевдоэксперты вольно или невольно, совершенно искренне или злонамеренно пользуются доверчивостью окружающих“.

И вот еще одна опасность: ложный оптимизм, основанный, с одной стороны, на редкой повторяемости селей и, с другой, — на чисто человеческом умении выдавать желаемое за действительность. Вот пример.

С 1898 г. начались горнооблесительные работы на Акташсае в горах Коржинтау недалеко от Ташкента. В книге „Россия, полное географическое описание нашего отечества“ (т. 19), изданной в 1913 г. и посвященной Туркестанскому краю, В. И. Масальский писал: „...Уже с 1903 г., т. е. через пять лет после начала работ, селевые потоки, катившие прежде каменные глыбы в 5000 пудов весом, значительно успокоились... Ныне... опасность от селей миновала“. В 1939 г. по Акташсаю прошел мощный селевой поток. А в 1978 г. во вновь изданной монографии С. М. Флейшмана „Сели“ констатируется: „...Лесоводы.., применив террасирование горных склонов в селеопасных бассейнах Аман-Кутан и Ак-Таш, добились прекращения селевой деятельности в этих бассейнах“. Самое интересное, что селевые очаги в верховьях Акташа, порождающие раз в несколько десятилетий грязекаменные потоки, существуют сами по себе и лесомелиорация их не затрагивала и затронуть не может.

20. СЕЛЕВИКИ И СЕЛЕВЕДЕНИЕ, ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЕ ДЕБРИ, КЛАССИФИКАЦИОННАЯ ЭПИДЕМИЯ

Наш ограниченный ум для удобства делит... мир на части: физику, биологию, геологию, астрономию, психологию и т. д., но ведь природа на самом деле никакого деления не знает!

Ричард Фейнман. Лекции по физике

Селеведение как наука о селевых потоках переживает стадию становления. До сих пор отдельными ее аспектами занимаются географы, гидрологи, геологи, и у нас мало примеров того, когда один селевик держит в сфере своего внимания селевую проблему в целом.

Селеведение взаимодействует с целым рядом традиционных отраслей науки:

гидрометеорологического цикла — метеорологией, гидрологией, гляциологией,

геологического цикла — инженерной геологией, гидрогеологией, грунтоведением, петрологией, литологией, вулканологией,

физико-математического цикла — механикой грунтов, гидравликой и гидромеханикой, реологией, прикладной и вычислительной математикой,

географического цикла — физической географией, геоморфологией, палеогеографией, геоботаникой, мерзлотоведением, технического цикла — гидротехникой, строительной механикой.

В самом селеведении довольно уверенно можно выделить разделы: селевые процессы, динамика селевых потоков, физико-механические свойства горной породы ПСМ и селевых отложений, селевые очаги, селевая метеорология и гидрология, селеметрия, география селевых явлений, прогноз селеопасности, вероятностный расчет селей, селезащита (этот раздел здесь записан условно, но об этом речь чуть ниже).

В настоящее время развитие науки немислимо без широких международных контактов, без обмена информацией. Селевики и здесь сумели выпасть из общей закономерности. У меня сложилось впечатление, что в мировом селеведении существуют по крайней мере четыре самостоятельные школы, слабо взаимодействующие друг с другом. Но что интересно, многие „болезни“ у селевиков всех школ более или менее одинаковы и главные из них — это склонность к общим словам, сомнительным

рассуждениям, увлечение классифицированием, уклонение от непосредственного изучения самих селевых процессов.

Альпийская школа объединяет французских, швейцарских, австрийских, немецких и итальянских селевиков. Ее истоки ведут к работам Александра Сюрелля о потоках в департаменте Верхние Альпы, в которых были сформулированы законы горной эрозии и селевой гидрографии (1841), Г. А. Коха о селях Тироля (1875) и селеопасных водотоках Альп (1883), Ф. Фреха о селевых потоках вообще и Альп в частности (1898) и многих других. В 1910 г. появилась книга И. Штинни „Die Migen, опыт монографии с особыми соображениями в отношении Тирольских Альп“, во многом определившая направление размышлений селевиков альпийской школы. Даже современные специалисты постоянно используют сравнения и аналогии со взглядами Штинни, его цифры и примеры. Затем селеведение во многом развивалось в плане обеспечения селезащиты. Современные достижения и взгляды селевиков этой школы нашли свое отражение в трудах международных симпозиумов альпийских стран: в Клагенфурте (1967), Виллахе (1971) и Инсбруке (1975).

Англо-американская школа. Импульсом для серьезного обращения к проблеме послужила информация о грязекаменных потоках, полученная на рубеже XIX и XX вв. от путешественников, главным образом английских, вернувшихся из Средней и Центральной Азии. К самым известным публикациям такого рода, оказавшим заметное влияние на современных селевиков, относятся „Восхождения и исследования в Каракорум-Гималаях“ (1894) и последующие статьи В. М. Конвея, наблюдавшего грязекаменные лавины в Каракоруме, и „Дуоб в Туркестане, физико-географические заметки и описание нескольких путешествий“ Рикмера Рикмерса, изучавшего „грязевые разливы“ в бассейне Зеравшана (1913). В научном отношении важны классификационная работа К. Ф. С. Шарпи „Оползни и родственные явления“ (1938), а также заметки Э. Блэкуайлдера (1928) о грязевых потоках как геологическом факторе в семиаридных горах, Р. Шарпа (1942) об образовании селевых валов на примере Вольф-Крика в горах Святого Ильи на территории Юкон в Канаде и Р. Шарпа и Л. Ноублса (1953) о грязевом потоке 1941 г. близ Райтвуда в Южной Калифорнии. Дальнейшее развитие селеведения происходило по линии приобретения опыта противоселевого строительства, особенно в районе Лос-Анджелеса, а также в плане тщательного изучения следов селевых катастроф с последующим изданием очень полезных отчетов, насыщенных цифрами и иллюстрациями.

Японская школа сформировалась недавно, в 60-е годы, и на первых порах явилась как бы ответвлением англо-американской. Сейчас ее отличают широкая организация лабораторных исследований, попытки разобраться в механизме селевых процессов, склонность наблюдать и измерять селевые потоки непосредственно.

Советская школа. Ее основы были заложены во второй половине прошлого века. С 1859 по 1895 г. регулярно появлялись работы Б. И. Статковского, посвященные „Казбекским завалам“, описанию селей на Шинчае и в Дилижане, проблеме селей Закавказья. Интересные описания селей на Акулисчае в Зангезурском хребте и на Кишчае оставили соответственно М. П. Псарев (1885) и Н. Н. Пыльцов (1904). Геологические аспекты селеобразования были обсуждены К. И. Богдановичем в работе „Два пересечения Главного Кавказского хребта“ (1902). Вопросы природы селевых потоков затронул в своей „Физической геологии“ И. В. Мушкетов (1903, 1926). В 1925 г. проблема селей выносятся И. Я. Зактрегером на рассмотрение I Всероссийского гидрологического съезда. В 1930 г. появилась первая, хотя и очень тоненькая, монография А. Л. Брилинского „Горные потоки, их природа и меры борьбы с ними“. В 1938 г. опубликована известная статья Е. П. Коновалова „Селевые потоки, опыт систематизации материалов“.

В послевоенные годы, в первую очередь в связи с необходимостью защиты Алма-Аты от селевых потоков, стали развиваться методы расчета характеристик селей. Поскольку эти методы были привнесены из гидрологической практики, то селевые явления стали практически отождествлять с ливневыми паводками, лишь отягченными большим количеством наносов. Некоторые грязекаменные потоки Кавказа, о высокой плотности которых было известно издавна, сочли редко наблюдаемым исключением из общего правила. Такое положение вещей сохранялось довольно долго и лишь в 70-е годы было ликвидировано окончательно.

В целом селевиков советской школы отличает стремление к широкому и всестороннему подходу к явлению: наряду с общими для всех школ вопросами решаются задачи прогноза и вероятностного расчета для нужд строительного проектирования. Важной представляется попытка создать теорию селевого процесса и организовать для этого эксперименты в природе и лаборатории.

Поскольку весь процесс классификации производится мысленно, мы можем выполнять его независимо от того, существует ли в действительности предмет, обладающий данной особенностью, или нет.

Льюис Кэрролл. Символическая логика

В отечественной литературе, посвященной проблеме селей, чуть ли не основное место занимают вопросы, так или иначе связанные с терминологией и классификацией.

Очень популярной оказалась классификация первого пред-

седателя селевой комиссии М. А. Великанова, предложившего делить селевые потоки на грязевые, грязекаменные и водокаменные, но, к сожалению, не давшего четких количественных определений каждого типа. Собственно, к таким терминам, как „грязевой“ и „грязекаменный“, заимствованным из старого лексикона, Великанов добавил крайне неудачный — „водокаменный“. Термин „водокаменный селевой поток“ внес значительную путаницу в селеведение, так как отличие такого потока от водных, транспортирующих взвешенные и влекомые наносы, неясно. Однако именно эта классификация быстро вошла в обиход селевиков и, если ее оценивать с научно-исторической точки зрения, принесла определенный вред. Под грязекаменными селями длительное время понимали все, что угодно, лишь бы в потоке двигались камни и присутствовала грязь, причем последнюю чаще всего просто отождествляли с грязной водой.

Сам процесс „творения“ классификаций селевых потоков по составу субстрата оказался для многих настолько привлекательным, что к трем названным типам селей в короткий срок были добавлены многие другие. Я насчитал не менее 25 вариантов. Среди них любые сочетания слов „камень, лед, снег“, а также такие „шедевры“, как „водно-пылеватый“, „водно-крупноглыбовый“, „льдо-водо-грязевой“, „водо-древесно-каменный“. Я не перечисляю фамилии авторов, многие из них — мои хорошие знакомые. Но мне интересно, как они называли бы селевой поток, созданный Гераклом при очистке авгиевых копоушен?

Сам Великанов, не в пример своим последователям, быстро убедился в „условном характере“ своей классификации и нашел целесообразным выделить два типа селевых потоков, различающихся по относительно содержанию воды и наносов. В той или иной форме этот же подход использовали М. С. Гагошидзе, предложивший различать „структурные“ (по наименованию режима движения, при котором тело потока скользит по руслу без каких-либо деформаций) и „турбулентные“ сели, и С. М. Флейшман, разделивший селевые потоки на „связные“ и „несвязные“. Согласно авторской концепции, в „связном селевом потоке“ вода присутствует в связанном состоянии, но в этом случае селевая масса находится на пределе текучести и такой поток может быть только неподвижным, если не иметь в виду возможность медленной пластической ползучести.

С моей точки зрения, использование каких-либо частных характеристик состава селевой массы или режима ее движения в качестве классификационных признаков противоречит внутренней логике самих классификаций и создает путаницу при диагностике конкретных селевых явлений. Поэтому лучше было бы, сохранив старую естественную терминологию по вещественному составу селей, подчеркнуть присутствие в потоках третьего типа горной породы в виде взвешенных и влекомых наносов, назвав их наносоводными.

Значительные усилия селевиков были затрачены на создание своеобразных псевдоклассификаций, представляющих собой замену количественных характеристик селевых потоков, селевых бассейнов и очагов определениями типа: слабый, средний, довольно сильный, очень сильный, разрушительный, уничтожающий, катастрофический; слабо-, весьма-, средне-, сильно-селеносный и т. д. Одна только эта тенденция способна ввергнуть селевиков в безнадежные дискуссии, например: считать ли данный бассейн „сильноселеносным“ или „селеносным весьма“.

Если комитет из формального органа для утверждения заранее принятых решений превратится в дискуссионный клуб, возможны самые отвратительные сцены.

Майкл Фрейн. Оловянные солдатики

В 1947 г. по инициативе президента Академии наук СССР С. И. Вавилова была организована селевая комиссия. Последняя, как группа ученых и производственников разного профиля, но имеющих отношение к данной проблеме, получила возможность направлять и координировать изучение селевых потоков. К сожалению, обстоятельства сложились так, что селевая комиссия функционировала в составе Академии наук, а центр тяжести исследований селевой проблемы сместился в сторону гидрометеорологического, а затем и геологического ведомств, и она не смогла хорошо выполнять предназначенную ей роль. Тем не менее ее работа в большой мере способствовала развитию исследований по проблеме.

На ежегодных пленарных заседаниях комиссии рассматривались разного рода организационные и методические вопросы, селевики советовались друг с другом, а время от времени вспыхивали безнадежные дискуссии по вопросам терминологии и классификаций. Только одно обсуждение животрепещущего вопроса „что такое сель“ неоднократно приводило селевую комиссию почти к гибели.

А вот как выглядит селевая комиссия в организационно-хронологическом аспекте:

Хронология	Организация Академии наук, в состав которой входит селевая комиссия	Председатель селевой комиссии
1947—1953	Отделение геолого-географических наук	Михаил Андреевич Великанов
1953—1959 1960—1973	Институт географии То же	То же Максим Феофанович Срибный
1973—...	Научный совет по инженерной геологии и грунтоведению	Семен Монсеевич Флейшман

Последнее время неоднократно заходила речь о том, что пора бы, дескать, переименовать селевую комиссию в противоселевую. Это, конечно, недоразумение. Сейчас проектируются многочисленные противоселевые сооружения. И камень преткновения — не выбор конструкции, а обоснование проектов, т. е. расчетные характеристики селей: объемы, расходы, скорости, плотности, вероятности. Для ливневых селей — это не до конца решенная проблема, для гляциальных же ее и решать даже не пытались. Вот главная точка приложения усилий селевой комиссии! А противоселевые сооружения и мероприятия — другая проблема. Ведь сосуществуют гидрология и гидротехника, науки с разными задачами, разные люди и разные НИИ занимаются ими. Точно так же должны одновременно иметь место селеведение и селевая гидротехника (селезащита, селетехника — ?). Академия наук создала селевую комиссию для развития именно селеведения. А если требуется новый орган, противоселевой, а он требуется, то за чем же дело стало?

И вообще, какой толк в таких потрясающих вещах, как потоны и наводнения, если тебе не с кем даже о них поговорить?

А. А. Милн. Винни-Пух

Селевников и много и мало. Много, если смотреть на переполненный конференц-зал в момент открытия представительно-го совещания. И мало, если принимать в расчет только конкретный вклад в селеведение. И все же корпорация селевников существует и, надо думать, растет и развивается. Поэтому безусловно полезной стороной деятельности селевой комиссии явилась организация разного рода совещаний, в том числе и все-союзных. Главное достоинство таких съездов селевников заключается именно в возможности встреч, обсуждения назревших вопросов, научной дискуссии, но... в основном в кулуарах. На официальных заседаниях времени не хватает, каждый с непонятным упорством старается успеть выплеснуть на борющуюся со сном аудиторию возможно большее количество информации, чаще всего интересной только докладчику. Противостоять этому стихийному бедствию никто не решается.

Конференциями, оставившими в истории селеведения достаточно заметный след, были: третья (Тбилиси, октябрь 1952 г.), отмеченная крупной дискуссией по терминологическим вопросам и известная своим „решением“ разделить селевые потоки на две категории — связанные (структурные) и текущие (турбулентные); четвертая (Алма-Ата, ноябрь 1956 г.), состоявшаяся вскоре после прохождения по Малой Алматинке гляциального селя и обсуждавшая среди прочих вопросы селеза-

щиты Алма-Аты; пятая (Баку, октябрь 1962 г.), одна из наиболее деловых.

Потом произошла странная вещь: селевая комиссия задним числом стала присваивать номера всесоюзных конференций различным совещаниям более узкого характера. Так, номера с шестого по девятый были распределены между несколькими селевыми кворумами, к числу которых, например, относится второе украинское совещание, имевшее место во Львове в декабре 1964 г. Таким вот образом очередная Всесоюзная конференция по селевым потокам и горным русловым процессам, состоявшаяся в Ереване в сентябре 1968 г., неожиданно стала десятой. А в решении совещания „Состояние и пути развития научных исследований по селевой проблеме и проектирования противоселевых сооружений“ (Тбилиси, октябрь 1974 г.) был записан пункт, предлагавший считать эту конференцию четырнадцатой! В результате всей этой эквилибристики с перенумерацией в сентябре 1978 г. в Ташкенте была проведена уже пятнадцатая Всесоюзная научно-техническая конференция по противоселевым мероприятиям.

21. ВСЯКАЯ ВСЯЧИНА О СЕЛЯХ

Сели прошлого

— Нынешние лошади не стоят прежних. Все вырождается,— сказал Портос.

Александр Дюма. Двадцать лет спустя

Несколько десятков тысяч лет назад Кордильерский ледник, заползая в бассейн реки Колумбии, одной своей лопастью подпруживал левый приток этой реки Кларк-Форк. Вода в долине поднялась до отметки 1270 м, что соответствовало глубине возле ледяной дамбы 610 м. Общая площадь этого громадного водоема, получившего кодовое название Мизула (по имени современного города на его месте), составляла 7500 км² при объеме 2168 км³! Прорыв озера Мизула был грандиозным. Озерные воды вырвались в нескольких местах из-под кромки ледяного щита и широкими потоками ринулись в долину Колумбии и на плато, которое в результате оказалось покрытым сложной сетью глубоких рвов. Самый крупный из них, Гранд-Кули, достигает в длину 80 км и в глубину 450 м. Следы уни-

кального прорывного паводка еще и сегодня обнаруживаются вплоть до города Портленда. Максимальный расход оценивается приблизительно в 10 млн. м³/с!

Около 9 тысяч лет назад на восточном крае плоскогорья Альтиплано в Боливии в результате сдвигового процесса возник грандиозный грязевой поток объемом около 2,7 млрд. м³. Поток двигался по рекам Ачокалья и Мальяса, после чего направился в долину реки Ла-Пас (бассейн Амазонки), создал там большое временное озеро Калакото и прошел вниз по реке более 20 км.

Примерно 2500 лет назад в исландском ледяном массиве Ватнайёкудль южнее вулкана Кверкфьёдль находилось подпруженное озеро объемом не менее 10 км³. Прорывной паводок с максимальным расходом до 400—500 тыс. м³/с пронесся на север по долине реки Йёкудльсау-ау-Фьёдлум, произведя перемещения породы объемом не менее 0,6—0,7 км³.

Сели на Марсе

...И Марс кругом, тихий, безмолвный.
Рэй Бредбери. Марсианские хроники

Предполагается выдающейся роль селевых потоков в формировании поверхности Марса. Поскольку вода на этой планете присутствует в толще горной породы в замерзшем состоянии, то любые внутрипланетные источники тепла вызывают образование гигантских грязевых скоплений, иногда изливающихся на поверхность чудовищными потоками. Быстродействующие сели возникают также в результате мгновенного таяния вечной мерзлоты при метеоритных ударах, что запечатлено, например, на фотографии 18-километрового метеоритного кратера Юти, полученной „Викингом-1“.

Сели в океане

И море — именно та область, та единственная стихия, где эти гиганты... могут родиться и существовать.

Жюль Верн. Двадцать тысяч лье под водой

При сдвиге (землетрясение, превышение критической мощности) донных отложений и их взвешивании в воде образуются мутьевые или турбидитные потоки, своего рода морские сели.

В ноябре 1929 г. возникший в результате сейсмического толчка у берегов Ньюфаундленда океанический селевой поток последовательно оборвал семь подводных кабелей связи, что позволило оценить его размеры и скорость движения. Максимальная скорость достигла 26 м/с, суммарный объем — 100 км³ (отложения потока расплылись примерно однометровой толщиной по площади 100 тыс. км²)!



Сели и «Киндзмараули»

Многие, наверное, пробовали знаменитое грузинское полусладкое натуральное вино „Киндзмараули“. Обязано оно своим существованием... селевым выносам Дуруджи. Дело в том, что в уникальное произведение винодельческого искусства, зовущееся „Киндзмараули“, можно превратить тот, и только тот виноград сорта „саперави“, который произрастал на черных глинистосланцевых отложениях, доставленных в Алазанскую долину грязекаменными потоками.

Высококачественная грязь из Лапианис-хеви

...Землистое вещество, образующее в смеси с водой вязную клейкую массу...

У. Уоррел. Глины и керамическое сырье

С Циви-Гомборского хребта на запад стекает небольшая речка Лапианис-хеви, в верховьях которой над лесной чащей возвышаются светло-серые утесы, сложенные конгломератами, глинами, песчаниками. „Лапи“ по-грузински — „грязь“. Действительно, при выпадении ливней по Лапианис-хеви спускаются потоки, состоящие из уникальной глинистой жижи и мелких (10—40 см) камней, погруженных в нее. Грузинские геологи и селевики братья Церетели, Эмиль Давидович и Джумбер Давидович, сообщают, что селевая масса, отложенная селевым потоком в 1964 г., через 13 месяцев под 30—

50-сантиметровой коркой сохраняла первоначальное качество и свежесть.

Горе ротозею-селевику, если он, движимый профессиональным любопытством, взойдет на селевые отложения Лапнанис-хеви. Некоторое время его телодвижения будут напоминать характерную хореографическую композицию с попеременным выдергиванием ног из ставшей необычно вязкой массы. Исход всегда бывает одинаковым: временное отвращение к селевой проблеме и длительное отмывание брюк и обуви в ближайшем чистом ручье. Но белесый глинистый налет исчезнет с этих предметов далеко не сразу.

Когда светло-серая глинистая жижа из Лапнанис-хеви вливается в Иори, жители селения Хашми с мешками и корзинами спешат к реке подбирать спасающуюся на берегу рыбу.

И еще интересный факт. Среди селевых отложений Лапнанис-хеви повсюду встречаются глинощебневые круглые образования размером от нескольких сантиметров до 2 м, напоминающие в разрезе кочан капусты, созданные селевыми валами по методу жука-навозника. Такие селевые глинистые окатыши встречаются и на Дуруджи.

Шутят не только физики*

Некоторые утверждают, что слово „селевик“ происходит от французского „се ля ви“.

Рассказывают, что первый председатель Селевой комиссии член-корреспондент АН СССР Михаил Андреевич Великанов на одном из совещаний сказал:

— А главную задачу — дать определение „что такое сель“, — Академия наук берет на себя.

Казахстанский гидролог Игорь Святославович Соседов как-то заметил, что каждый алма-атинец считает, что помимо своего главного занятия он хорошо разбирается в двух вопросах: футболе и селевых потоках.

Сельмаг — личность, дающая прогноз селеопасности.

Сельсовет — обсуждение селевой проблемы.

* Название раздела в сборнике *Физики продолжают шутить*, 1968

СОДЕРЖАНИЕ

От автора	3
1. Горы и потоки	4
2. Селы на планете	8
3. Антология знаменитостей	12
4. Ливни...	31
5. ...И их последствия	33
6. Обреченность ледяных плотин	38
7. Тревожная жизнь моренных озер	47
8. Из чрева глетчеров	52
9. Рождение потока	55
10. Селевые очаги	74
11. Селевая масса	78
12. Сель идет!	84
13. Землетрясения и селы	100
14. Вулканы и лахары	102
15. Увидеть и измерить	109
16. Возможность присутствия	113
17. Вероятность, селевые потоки и математическое моделирование	120
18. Размышления о прогнозе селеопасной погоды и селеопасности	125
19. Угроза требует ответа	130
20. Селевики и селеведение, терминологические дебри, классификационная эпидемия	134
21. Всякая всячина о селях	140

ЮРИЙ БОРИСОВИЧ ВИНОГРАДОВ

ЭТЮДЫ О СЕЛЕВЫХ ПОТОКАХ

Редактор Л. П. Жданова. Художник В. В. Быков. Технический редактор
Л. М. Шишкова. Корректор Л. А. Сандлер

ИБ № 1094

Сдано в набор 13.09.79. Подписано в печать 18.04.80. М-23341. Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага тип. № 2 и офсетная. Гарнитура литературная. Печать высокая и офсетная. Усл. печ. л. 8,4 с вкладкой. Уч.-изд. л. 10,49. Тираж 65 000 экз.
Индекс ПЛ-239. Заказ № 2678. Цена 50 коп. Гидрометеиздат. 199053.
Ленинград. 2-я линия, д. 23.

Полиграфический комбинат им. Я. Коласа Государственного комитета Белорусской ССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
220005, Минск. Красная, 23.