

УДК 551.311.21:627.141.

**ЯВЛЕНИЕ СКАЧКООБРАЗНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ПЛОТНОСТИ СЕЛЕВОЙ  
МАССЫ – СЛЕДСТВИЕ НЕОДНОЗНАЧНОЙ ЕЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТ УКЛОНА  
ПУТИ ДВИЖЕНИЯ СЕЛЯ**

Б.С. Степанов<sup>1</sup> д.г.н., Р.К. Яфязова<sup>1</sup> д.т.н.

<sup>1</sup>РГП «Казгидромет», г. Алматы, Казахстан

E-mail: bs.stepanov@gmail.com

Характеристики каждого локального объема селя непрерывно изменяются в зависимости от: пути его движения (уклона, ширины и шероховатости русла), расхода, гранулометрического и минералогического составов рыхлообломочных пород, участвующих в селеформировании, плотности, вязкости, пластичности селевой массы и т.д. До настоящего времени принято считать, что плотность селевой массы зависит однозначно от уклона пути движения селя. В результате экспериментальных и теоретических исследований, проведенных в Казахском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте (КазНИГМИ) установлено, что ход селевого процесса зависит от плотности селевой массы. Выявление неоднозначности плотности селевой массы от уклона пути движения селя привело к открытию природного явления – скачкообразного изменения плотности селевой массы при превышении критического значения уклона пути движения селя (эффект Степанова). Учет неоднозначности плотности селевой массы от уклона пути движения селя является ключевым элементом при расчете характеристик селя.

**Ключевые слова:** сель, селевая масса, плотность, вязкость, пластичность, концентрация, стесненность, уклон, расход, объем, однозначная (неоднозначная) зависимость.

Поступила: 09.11.2022

DOI: 10.54668/2789-6323-2022-105-2-59-77

---

*Открытие явления, ныне известного как эффект Черенкова, представляет собой интересный пример того, как относительно простое физическое наблюдение при правильном подходе может привести к важным открытиям и проложить новые пути для дальнейших исследований.*

*Карл Манне Георг Сигбан (из речи при получении Нобелевской премии)*

**ВВЕДЕНИЕ**

В 60...80-х годах прошлого столетия в СССР господствовали представления о том, что селевая масса большой плотности (2200...2500 кг/м<sup>3</sup> и более) образуется при трансформации оползневых процессов. «Сель – это движущийся по склону или по руслу горного водотока грязекаменный,

грязецебневый или грязевой поток, который при прекращении движения, отлагаясь, не распадается на головные части, а как бы медленно застывает» (Гагошидзе М.С., 1970).

Считалось, что взаимодействие водного потока с селеформирующими породами не может приводить к формированию грязекаменного селя большой плотности, так как турбулентный режим движения селя (основной источник энергии перемешивания селевой массы) прекращается, если объемная концентрация твердой компоненты селевой массы превысит значение 0,4 (плотность 1690 кг/м<sup>3</sup>) (Великанов М.А., 1948).

Вероятно, поэтому не обращали внимания на то, что грязекаменные сели большой плотности могут перемещаться без изменения плотности селевой массы и на малых уклонах.

Результаты экспериментальных работ по воспроизведению селей в натуральном масштабе на Чемолганском полигоне, проведенных Казахским научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом (КазНИГМИ) в период 1972...1978 гг. и последующее теоретическое и экспериментальное исследование реологических свойств селевой массы, коренным образом изменили представления о зарождении, развитии, деградации и остановки селей.

### 1. НЕОДНОЗНАЧНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ СЕЛЕВОЙ МАССЫ ОТ УКЛОНА ПУТИ ДВИЖЕНИЯ СЕЛЯ

Сель – результат многофакторных процессов. Одним из простых процессов является сдвиг и движение рыхлообломочных пород, накопленных в селевой рывтвине

(Руководство по изучению селевых потоков, 1976) при заполнении порового пространства водой (Гагошидзе М.С., 1970; Степанов Б.С., Яфязова Р.К., 2014). Критическое значение уклона, превышение которого приводит к началу селевого процесса, может быть определено по формуле

$$H > \frac{\tau_{см}}{\rho_{см} g \sin \alpha}, \quad (1)$$

где  $H$  – глубина селя, м;  $\tau_{см}$  – предельное напряжение сдвига селевой массы, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho_{см}$  – плотность селевой массы, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha$  – уклон пути движения селя, градус.

Как может изменяться минимальный уклон пути движения крупных фракций селевой массы за счет собственной потенциальной энергии (в условии действия силы Архимеда) показано в таблице 1.

Таблица 1  
Зависимость уклона, на котором происходит сдвиг частиц, от плотности селевой массы их вмещающей

$\rho_m, \text{кг/м}^3$	$\rho_{см}, \text{кг/м}^3$	$\rho_m - \rho_{см}, \text{кг/м}^3$	$\sin \alpha$	$\alpha$
2650	1000	1650	0,373	20°30'
2650	1200	1450	0,328	18°10'
2650	1600	1050	0,237	13°20'
2650	2000	650	0,147	8°20'
2650	2200	450	0,102	5°00'
2650	2400	250	0,0396	2°20'
2650	2500	150	0,0237	1°20'

Примечание:  $\rho_m$  – плотность твердой компоненты селевой массы.

Наиболее сложным процессом является эрозионно-сдвиговый процесс, в результате которого водный поток трансформируется в грязекаменный сель. Основными его характеристиками являются расход и объем, а также плотность селевой массы. Их значения определяются уклоном и длиной селевого очага, расходом и объемом водного потока, гранулометрическим и минералогическим составами рыхлообломочных пород (степенью их увлажне-

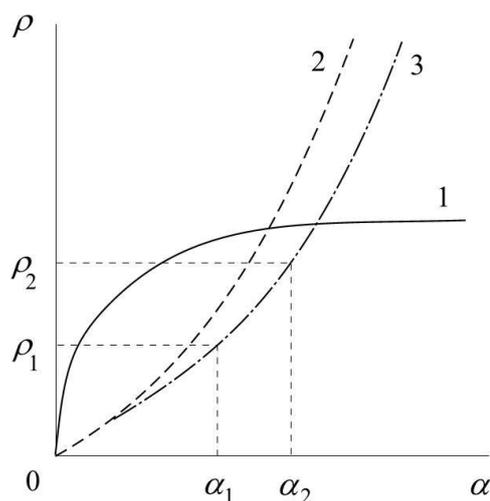
ния, устойчивостью к эрозии, эродирующей способности селевой массы и т.д.), принимающих участие в селеформировании.

На рисунке 1 приведены графики, отображающие, по мнению И. Штини, М.А. Мосткова и Т. Такахаша, зависимость плотности селевой массы от уклона селевого очага (Степанов Б.С., Яфязова Р.К., 2014). Несмотря на существенное различие в форме графиков, они относятся к классу непрерывных однозначных функций.

При прогнозе развития селевого процесса указанное обстоятельство играет важную роль. Физическая интерпретация обсуждаемых зависимостей дает основание утверждать, что плотность селевой массы (концентрация твердой компоненты в селевой массе) «... большая, нежели ... значение, определяемое соотношениями между уклоном и предель-

ной концентрацией, ... невозможна ...» (Флейшман С.М., 1978).

Другими словами, при перемещении селя с плотностью  $\rho_2$ , образовавшегося на уклоне  $\alpha_2$ , на уклон  $\alpha_1$  ( $\alpha_2 > \alpha_1$ ) неизбежно уменьшение плотности селевой массы до соответствующего данному уклону значения  $\rho_1$  ( $\rho_1 < \rho_2$ ).



**Рис. 1.** Зависимость предельной плотности селевой массы от уклона русла по: 1 – И. Штини; 2 – М.А. Мосткову; 3 – Т. Такахаши

Приведенные сведения о предельно возможной транспортирующей способности селей вступали в противоречие с данными наблюдений, свидетельствующими о том, что селевые потоки, плотность которых могла изменяться от 2300 до 2500 кг/м<sup>3</sup>, перемещались на относительно малых уклонах ( $\sin \alpha$  колебался от 0,02 до 0,07) на несколько километров (Марков И.Н. и др., 1983; Тихомиров Ю.П., Шевырталов Е.П., 1985). Острота этого противоречия до конца 60-х годов прошлого столетия сглаживалась установившимися к тому времени представлениями о существовании двух категорий селей: связанных (ламинарных) и несвязных (турбулентных). Возникновение селей первой категории (структурных, связанных, ламинарных), движение всех частиц в которых происходит со средней скоростью потока (Мостков М.А., 1957), увязывалось с переходом в текучее состояние водонасыщенных грунтов. Возможность движения образующейся селевой массы определялась превышени-

ем сдвигающей силы над удерживающей.

Считалось, что сели второй категории (несвязные, турбулентные), скорость движения твердой и жидкой компонент в которых различна (Мостков М.А., 1957), образуются в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами, слагающими русло, на что расходуется потенциальная энергия твердой и жидкой компонент селевой массы.

Из рисунка 1 следует, что если плотный сель сформировался на большом уклоне, то его перемещение на малый уклон должно привести к уменьшению плотности селевой массы. Однако изучение процесса движения селя 1921 года по улицам г. Верный (Алматы) (на участке пр. Абая – пр. Райымбек, длина участка 3,1 км, средний уклон 2°) показало, что на малом уклоне плотность селевой массы могла не только уменьшаться, но и увеличиваться за счет эрозионного процесса. «... Крупные камни плыли в потоке не переворачиваясь, так как не касались дна русла.

Перемешивание в потоке было незначительным, поскольку скорость потока была относительно небольшой». Уменьшение плотности происходило потому, что отлагались глыбы, превышающие 1 м (рис. 2).

Это объясняется тем, что глыбы большего размера выступали за поверхность движущейся селевой массы, при этом действие Архимедовой силы уменьшалось, что приводило к их остановке (Яфязова Р.К., 2007).



*Рис. 2. Отложение селя 1921 года на ул. Капальской (ныне Кунаева)  
(автор фотографии не известен)*

Зарождение селей, их движение по руслам и поймам рек, конусам выноса, расположенным на предгорной равнине – сложные физические процессы. Впервые гипотеза о неоднозначной зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя была опубликована в 1980 году (Степанов Б.С., 1980 а). Для проверки этой гипотезы в КазНИГМИ было разработано и изготовлено устройство, схема которого приведена на рисунке 3.

Размер цилиндра: диаметр – 75 мм, длина – 155 мм, шероховатость – 5 мм, шаг шероховатости – 35 мм. В роли твердой компоненты выступали селевые отложения, взятые на конусе выноса р. Улкен Алматы (максимальный размер частиц, использованных в экспериментах, не превышал 2 мм).

Селевая масса различной плотности загружалась поочередно в цилиндр, приводившийся во вращательное движение. Определялась минимальная мощность, необходимая для того, чтобы твердая компонента перешла во взвешенное состояние.

Результаты экспериментов приведены на рисунке 4. Нетрудно

видеть, что при увеличении объемной концентрации твердой компоненты от нуля до 0,17...0,18, мощность, затрачиваемая на взвешивание, увеличивается. Дальнейший рост концентрации твердой компоненты не только не нуждался в увеличении мощности, затрачиваемой на перемешивание селевой массы, но и имела место обратная закономерность.

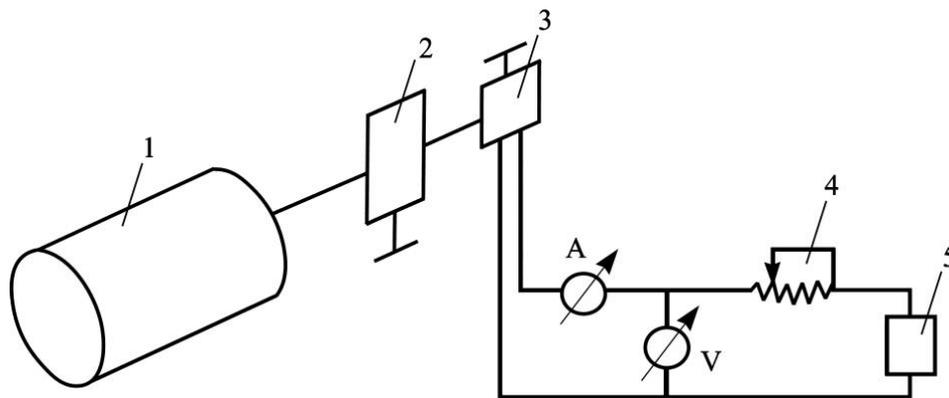
Объясняется это тем, что гидравлическая крупность частицы ( $W$ ) зависит от степени стесненности падающих частиц (Великанов М.А., 1948)

$$W = w_0(1-C) \quad (2)$$

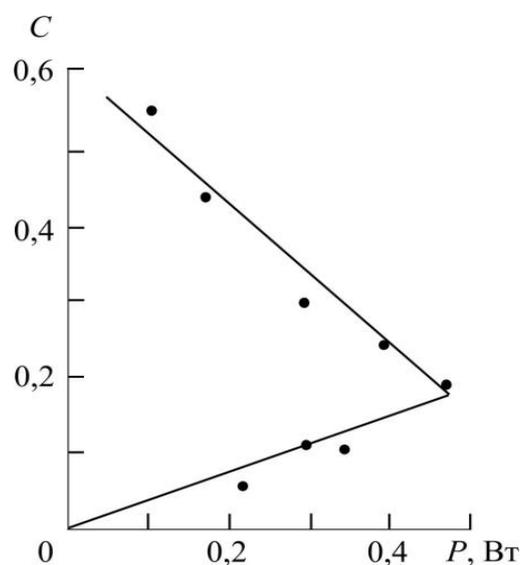
где  $w_0$  – гидравлическая крупность единичной частицы в воде, м/с;  $C$  – объемная концентрация частиц (одного размера и формы) твердой компоненты селевой массы. В настоящее время считается, что

$$W = w_0(1-C)^n \quad (3)$$

где  $n$  – число, изменяющееся в пределах 2...4,2 в зависимости от числа Рейнольдса.



**Рис. 3.** Схема устройства для измерения энергии, необходимой для поддержания твердой компоненты селевой массы во взвешенном состоянии. 1 – цилиндр; 2 – редуктор; 3 – электродвигатель; 4 – реостат, 5 – блок питания.  
A – амперметр, V – вольтметр



**Рис. 4.** Зависимость мощности, необходимой для поддержания частиц твердой компоненты селевой массы во взвешенном состоянии, от объемной концентрации твердой компоненты

О степени влияния стесненности падения частиц на их гидравлическую крупность можно судить по данным таблицы 2.

При полидисперсном составе твердой компоненты селевой массы влияние стесненности падения частиц на величину их гидравлической крупности, скорее всего, уменьшается. В определенной мере это будет компенсироваться проявлением Архимедовой силы, влияние которой возрастает с увеличением размеров частиц за счет увеличения плотности «тяжелой жидкости» (смеси воды и частиц, размер которых на порядок

меньше частиц, находящихся под действием силы Архимеда), в которой они находятся.

С увеличением концентрации твердой компоненты гидравлическая крупность частиц будет уменьшаться также из-за увеличения вязкости и пластичности селевой массы. Существование неоднозначной зависимости плотности селевой массы грязекаменных селей от уклона пути их движения подтверждается отложением крупных фракций твердой компоненты селя на периферийной части конуса выноса, уклон которого находится в пределах  $0,5...2^\circ$  (рис. 5).

Степень влияния стесненности падения частиц на их гидравлическую крупность

$C$	$(1-C)$	$(1-C)^2$	$(1-C)^3$	$(1-C)^4$
0,05	0,95	0,90	0,86	0,81
0,1	0,90	0,81	0,73	0,66
0,2	0,80	0,64	0,51	0,41
0,3	0,70	0,49	0,34	0,24
0,4	0,60	0,36	0,22	0,13
0,5	0,50	0,25	0,12	0,062
0,6	0,40	0,16	0,064	0,026
0,7	0,30	0,09	0,027	0,0081
0,8	0,20	0,04	0,008	0,0016
0,9	0,10	0,01	0,001	0,0001

Примечание:  $C$  – объемная концентрация твердой компоненты.

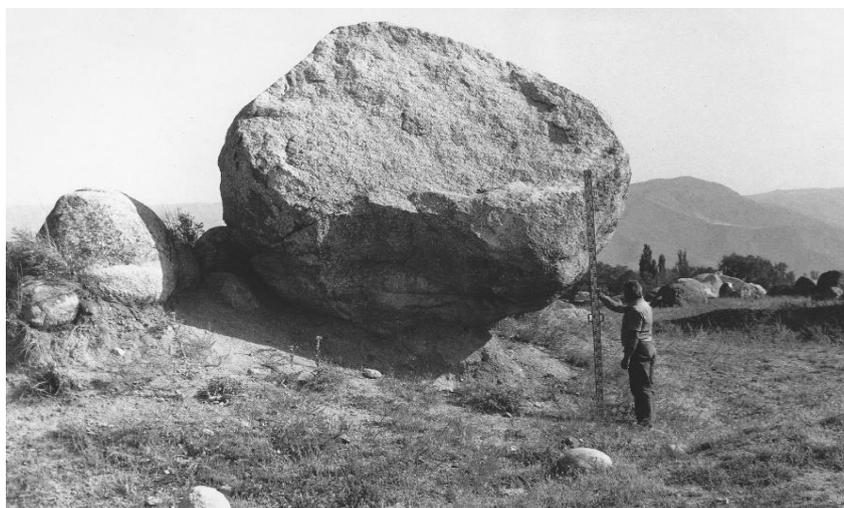


Рис. 5. Селевые отложения в нижней части конуса выноса р. Сарыкан (Жетысу Ала-тау) (рабочий материал КазНИГМИ)

## 2. АКСИОМАТИЧЕСКОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ОТРИЦАТЕЛЬНОГО НАКЛОНА У ГРАФИКА ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ СЕЛЕВОЙ МАССЫ ОТ УКЛОНА ПУТИ ДВИЖЕНИЯ СЕЛЯ

### 2.1. Аксиомы существования селя

1. Селевая масса – смесь горных пород, представленных полидисперсными частицами, размеры которых могут отличаться на порядки (от долей микрона до 10 м и более) и жидкой компоненты (воды).

2. Селевой процесс – совокупность процессов, составляющих этапы подготовки, зарождения, разви-

тия, деградации и остановки селя.

Селевой процесс стремится к динамическому равновесию, которое характеризуется состоянием селевой массы, при котором не происходит изменение ее плотности.

Селевой процесс носит стационарный характер, если плотность, вязкость и пластичность селевой массы, а также гранулометрический и минералогический составы твердой компоненты селевой массы сохраняются неизменными при постоянном значении характеристик пути движения, глубины, расхода и скорости селевого потока.

Если селевой процесс носит стационарный характер, все частицы твердой компоненты селевой массы и жидкая

компонента перемещаются с одинаковой скоростью.

3. Возможность вовлечения твердой компоненты в селевой процесс определяется мощностью селя, которую он может затратить на увеличение плотности селевой массы.

4. Если мощность селя, затрачиваемая на поддержание частиц твердой компоненты во взвешенном состоянии, меньше необходимой, происходит частичный распад селевой массы, при котором происходит поочередное (от крупных к более мелким) оседание частиц до тех пор, пока мощность потока, которая может затрачиваться на их поддержание во взвешенном состоянии, не уравнивается с мощностью, необходимой для поддержания твердой компоненты во взвешенном состоянии.

5. Под критическим уклоном понимается значение уклона пути движения селя, при превышении которого все фракции твердой компоненты селевой массы принимают участие в селеобразовании. В такой ситуации, при наличии селеформирующего грунта и неограниченной длине пути движения селя, плотность селевой массы увеличивается до предельного состояния (потери текучести).

6. За минимальный расчетный объем селевой массы принимается объем, величина которого (как минимум) на порядок больше объема наиболее крупной частицы, принимающей участие в селевом процессе.

7. Уровень современных знаний об условиях формирования селей и свойствах селевой массы позволяет постулировать: водный поток, взаимодействуя с рыхлообломочными горными породами, представленными полидисперсными частицами, трансформируется в селевой поток большой плотности ( $2300...2500 \text{ кг/м}^3$ , при плотности твердой компоненты  $2650 \text{ кг/м}^3$ ) при превышении критического значения расхода водного потока (зависит от гранулометрического состава селеформирующих пород) и уклона русла (пути движения селя).

8. В начальной фазе формирования селя крупные фракции твердой компоненты перемещаются качением и сальтацией. Экспериментально было установлено, что обломки горных пород, размером бо-

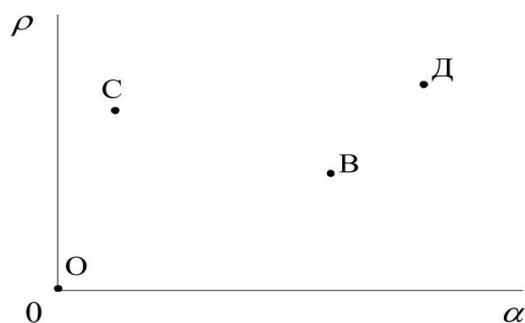
лее  $0,2 \text{ м}$ , после триггера развивают в воздушной среде (на горном склоне, уклон которого превышает  $11...12^\circ$ , под действием силы тяжести) скорость качения и (или) сальтации, значительно превышающую скорость формирующегося селя.

9. Средняя скорость движения всех фракций твердой компоненты и водной компоненты одинакова. Подтверждением тому – отсутствие водного потока перед головным валом селя, что наблюдалось при проведении экспериментов по воспроизведению селей в натуральном масштабе КазНИГМИ (водный поток с расходом  $28 \text{ м}^3/\text{с}$  трансформировался в селя с расходом  $430 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

## 2.2. Теорема о графике зависимости между плотностью селевой массы и уклоном (имеющем сегмент с отрицательным наклоном)

Если график зависимости между плотностью селевой массы и уклоном пути движения селя непрерывная линия (малому изменению значения абсцисс соответствует малое изменение значения ординат); каждое последующее значение ординат превышает предыдущее; твердая компонента селевой массы перемещается в квазивзвешенном состоянии; плотность селевой массы может увеличиваться до потери текучести; глубина потока превышает размер наиболее крупных частиц; вязкость и пластичность селевой массы являются непрерывными функциями плотности селевой массы, то график зависимости плотности селевой массы от уклона, на котором селя перемещается без распада и остановки, имеет сегменты с положительным (при увеличении угла наклона пути движения селя плотность селевой массы увеличивается) и отрицательным (при уменьшении угла наклона пути движения селя плотность селевой массы также увеличивается) наклонами.

При доказательстве теоремы использовались характеристики селей Иле и Жетысу Алатау, отложившиеся в предгорной зоне, и пустыне Жаманкум. На рисунке 6 приведено расположение точек О, В, С и Д, характеризующих наиболее важные моменты селеформирования.



*Рис. 6. Расположение точек на координатной плоскости (уклон пути движения селя; плотность селевой массы), положение которых не требует доказательства или получены экспериментально*

**Точка О.** Начало селевого процесса, плотность потока –  $1000 \text{ кг/м}^3$ .  
**Точка В.** Уклон, при котором все фракции твердой компоненты селевой массы перемещаются во взвешенном состоянии с одинаковой средней скоростью.

Результаты экспериментов по воспроизведению селей в натуральном масштабе в бассейне р. Чемолган, анализ условий формирования селей в бассейнах рек Киши и Улкен Алматы (Иле Алатау) и в бассейне р. Сарыкан (Жетысу Алатау) показали, что минимальный уклон очага селеобразования, при котором все фракции горных пород принимают участие в селеформировании, должен превышать  $11...12^\circ$ , а расход воды – превышать  $6 \text{ м}^3/\text{с}$ . Такой уклон очага селеобразования обеспечивает (в начальной фазе селеформирования) самостоятельное (под действием силы тяжести) движение камней и глыб. Если размер частиц селеформирующих горных пород не превышает  $0,2 \text{ м}$ , они перемещаются во взвешенном состоянии за счет потенциальной энергии жидкой компоненты селевой массы до тех пор, пока эту роль не начнут выполнять вязкость и пластичность селевой массы.

При гранулометрическом составе селеформирующих пород пустынь минимальный уклон очага селеобразования может составлять  $2...3^\circ$ , а движение сформированной плотной селевой массы может происходить на уклоне менее  $1^\circ$  (сель 1988 года в пустыне Жаманкум (Яфязова Р.К., 2007)).

В результате наблюдений за условиями зарождения, развития, деградации и остановки селей установлено, что на малых

уклонах (менее  $2...3^\circ$ ), когда селеформирующие горные породы имеют полидисперсный состав, грязекаменные сели не образуются.

**Точка С.** Сформировавшийся сель может перемещаться на малых уклонах: наблюдаемое значение селевых отложений с плотностью  $2400...2500 \text{ кг/м}^3$  на уклоне  $2...3^\circ$  (сель 1921 года на территории г. Верного (Яфязова Р.К., 2007)). Отложение валунов и глыб обусловлено уменьшением Архимедовой силы, когда их размеры превышали глубину потока (см. рис. 2).

Ситуация, при которой твердая компонента селевой массы – песок, имела место при прорыве накопителя сточных вод в пустыне Жаманкум.

**Точка Д.** Плотность селевой массы, при которой она теряет текучесть (рис. 7) в результате: аномально большой концентрации грунта в селевой массе; аномально большого содержания глинистых фракций в селевой массе; уменьшения содержания жидкой компоненты селевой массы вследствие инфильтрации воды в подстилающий грунт.

Абсцисса и ордината точки Д зависят (как и все остальные точки обсуждаемой зависимости) от морфометрических характеристик пути движения селя, его глубины, плотности селевой массы, гранулометрического и минералогического составов ее твердой компоненты.

Очевидно, что при построении графика зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя точку О нужно соединить с точкой В.



Рис. 7. Отложения селевого потока 1977 года в пойме р. Улкен Алматы (рабочий материал КазНИГМИ)

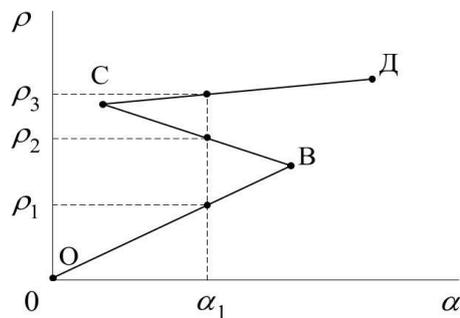


Рис. 8. График зависимости между плотностью селевой массы и уклоном пути движения селя

Точку В можно соединить с точкой С или точкой Д. При соединении точки В с точкой Д продолжением графика будет соединение точки Д с точкой С. Однако при этом нарушается условие теоремы, что каждое последующее значение должно превышать предыдущее. Следовательно, необходимо точку В соединить с точкой С, а точку С с точкой Д (рис. 8).

Нетрудно видеть, что полученный график ОВСД имеет положительный сегмент ОВ (плотность селевой массы возрастает с увеличением угла наклона пути движения селя), отрицательный сегмент ВС (плотность увеличивается с уменьшением уклона) и положительный сегмент СД (плотность селевой массы возрастает с увеличением угла наклона пути движения селя). Из графика следует, что зависимость изменения плотности селевой массы от уклона пути движения селя неоднозначна: одному и тому же значению уклона пути движения селя ( $\alpha_1$ )

соответствует три значения плотности селевой массы (первое значение ( $\rho_1$ ) на сегменте ОВ, второе ( $\rho_2$ ) на сегменте ВС и третье ( $\rho_3$ ) на сегменте СД), поэтому расчет зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя является ключевым элементом при расчете характеристик селей.

Морфометрические характеристики пути движения селя, глубина потока, реологические характеристики и плотность селевой массы определяют состояние локальных объемов селя (увеличение, уменьшение или стабильность плотности селевой массы) на пути его движения.

График, получаемый путем соединения точки В с точкой Д, характерен для селей, в движении которых решающую роль играет кулоновское трение, препятствующее движению потока. Зависимость плотности селевой массы от уклона пути движения селя однозначна: с увеличением уклона плотность селевой массы увеличивается.

Анализ условий формирования и развития селя, образовавшегося в пустыне Жаманкум, подтвердил существование неоднозначной зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя. Уместность привлечения характеристик селя, образовавшегося в пустыне Жаманкум, для верификации зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя связана с практической однородностью размера частиц, принимавших участие в селеобразовании, а также тем, что в селевой процесс, вызванный прорывом накопителя сточных вод с объемом воды около 36 млн м<sup>3</sup>, было вовлечено 36,5 млн м<sup>3</sup> песка.

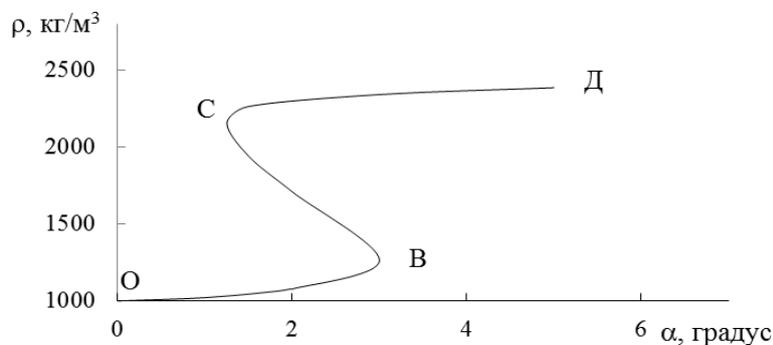
Селевой поток перемещался по руслу и пойме р. Каскелен (средний уклон около 0,5°) десятки километров. Содержание глинистых фракций в песках Жаманкума было

настолько мало, что при концентрации твердой компоненты близкой к пределу текучести, селевая масса практически не обладала пластичностью. Следовательно, частицы песка перемещались в составе суспензии во взвешенном состоянии. В результате в пустыне Жаманкум образовался каньон шириной 50...80 м и протяженностью около 6 км (рис. 9). Отсутствие русла на плоском дне каньона свидетельствовало о том, что ширина селевого потока была равна ширине дна каньона.

После опорожнения накопителя сточных вод селевой процесс инициировался оползнями, возникавшими на бортах накопителя. Плотность оползней была близка к максимальному значению, что позволяло сформировавшемуся селю перемещаться (даже при отсутствии пластичности) 6 км на уклоне близком к 0,5°.



**Рис. 9.** Каньон (длиной около 6 км), образовавшийся в результате формирования селя 28...29 января 1988 года в пустыне Жаманкум (рабочий материал КазНИГМИ)



**Рис. 10.** Зависимость плотности селевой массы от уклона пути движения селя (сель 1988 г. в пустыне Жаманкум)

Характеристики зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя (рис. 10) зависят от гранулометрического состава твердой компоненты

селевой массы. При расчете графика предполагалось, что глубина потока равна 1 м. Гранулометрический состав твердой компоненты селя 1988 года представлен в таблице 3.

Таблица 3

Гранулометрический состав песков Жаманкум (в процентах)

Глубина отбора проб, см	Фракции, мм			
	1...0,5	0,5...0,25	0,25...0,1	<0,1
0...3	3,4	50,3	37,5	8,8
3...6	1,2	32,0	56,1	10,7
6...9	2,2	36,3	55,2	6,3
9...12	1,1	22,2	59,8	16,9
12...20	4,2	34,3	49,6	11,9
20...50	1,8	30,0	54,9	13,3
Среднее по шести горизонтам	2,3	34,2	52,2	11,3

На рисунке 11 представлен график зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя, рассчитанный с использованием гранулометрического состава селевых отложений в бассейне р. Киши Алматы. Гранулометрический состав твердой компоненты селевой массы,

типичный для бассейна р. Киши Алматы, представлен в таблице 4. При расчете графика предполагалось, что глубина потока равна 1 м, фракции размером 100...1000 и 1000...10000 мм перемещаются самостоятельно (под действием силы тяжести) до плотности селевой массы 2000 кг/м<sup>3</sup>.

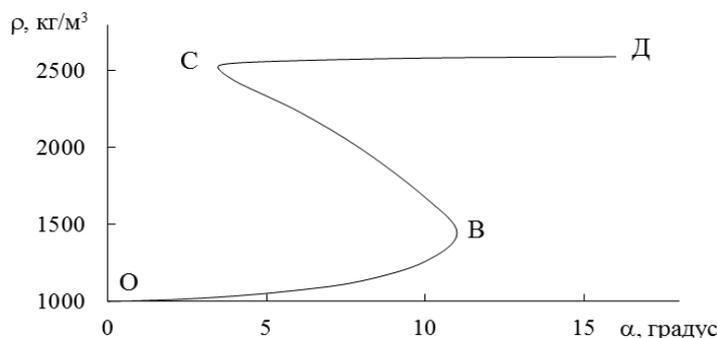


Рис. 11. Зависимость плотности селевой массы от уклона пути движения селя (бассейн р. Киши Алматы)

Таблица 4

Гранулометрический состав морен бассейна р. Киши Алматы (Иле Алатау)

Размер фракций, мм	0...0,1	0,1...1	1...10	10...100	100...1000	1000...10000
Содержание частиц грунта, %	4	7	19	30	36	4

Сравнение зависимостей плотности селевой массы от уклона пути движения селя, приведенных на рисунках 10 и 11 показывает, что затраты на удержание твердой компоненты во взвешенном состоянии мо-

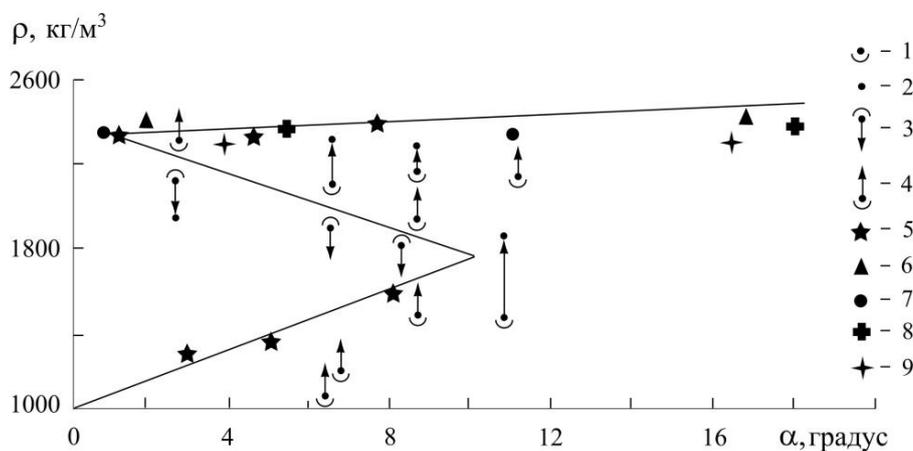
гут не только увеличиваться, но даже уменьшаться. Поскольку возможность теоретического описания кинематики формирования селевой массы в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными

породами представляется проблематичной, данные о предельных условиях существования селевой массы, необходимые для дальнейшего развития теории формирования селевой массы и решения практических задач по защите от селей, могут быть получены экспериментальным путем (Степанов Б.С., 1980 б).

Круговой лоток, спроектированный и изготовленный в КазНИГМИ, имеет следующие характеристики: диаметр – 1350 мм, ширина – 1000 мм. Внутренняя поверхность лотка снабжена шероховатостями (стальными полосами высотой 60...70 мм и длиной 800 мм). Для возврата обломков, захваченных элементами шероховатости, внутри лотка по всей его ширине установлена наклонная плоскость. Лоток загружался двухкомпонентной смесью до уровня 370 мм, затем приводился во вращение вокруг горизонтальной оси с угловой скоростью, обеспечивающей равномерное распределение твердого компонента в теле потока. Плотность массы потока определялась путем отбора пробы объемом 9 дм<sup>3</sup> в поверхностном слое (толщиной 100...150

мм) в его центральной части. Затем скорость вращения постепенно снижалась до тех пор, пока плотность смеси не начинала уменьшаться вследствие превышения скорости распада смеси над скоростью взвешивания твердой компоненты. В этот момент определялись угловая скорость вращения лотка, уклон свободной поверхности смеси, поверхностная скорость ее движения и плотность селевой массы. Рассчитывался также уклон свободной поверхности селевой массы в лотке при его остановке. К сожалению, при большой плотности смеси, из-за несовершенства электрического привода лотка, не удалось получить минимальные углы наклона свободной поверхности потока, при которых еще не происходит распад селевой массы.

На рисунке 12 приведены результаты экспериментов по выявлению зависимости между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором не происходит ее распад. Зависимость получена для селевой массы, гранулометрический состав твердого компонента которой близок к усеченному составу рыхлообломочных пород Иле Алатау.



**Рис. 12.** Результаты экспериментальных исследований и данные наблюдений. 1 – начальное значение плотности; 2 – конечное значение плотности; 3 – распад селевой массы; 4 – обогащение селевой массы; 5 – данные, полученные на круговом лотке.

Данные наблюдений: 6 – сель 1921 г. (бассейн р. Киши Алматы);  
7 – сель 1982 г. (бассейн р. Сарыкан); 8 – сель 1963 г. (бассейн р. Есик);  
9 – искусственный сель 1975 г. (Чемолганский экспериментальный полигон)

Во всем диапазоне плотностей селевой массы течение носило турбулентный и квазиламинарный характер, дви-

жения с ядром не наблюдалось. Таким образом, график зависимости (рис. 13) делит плоскость ( $\rho$ ,  $\alpha$ ) на область распада (М)

и область набора (N), что позволяет прогнозировать эволюцию селевого потока. Результаты вычислений хорошо согласуются с данными наблюдений за прохождением селей и позволяют осуществлять количе-

ственную интерпретацию тех особенностей селевых процессов, которые не находили качественного объяснения в рамках общепринятых представлений о селевых явлениях.

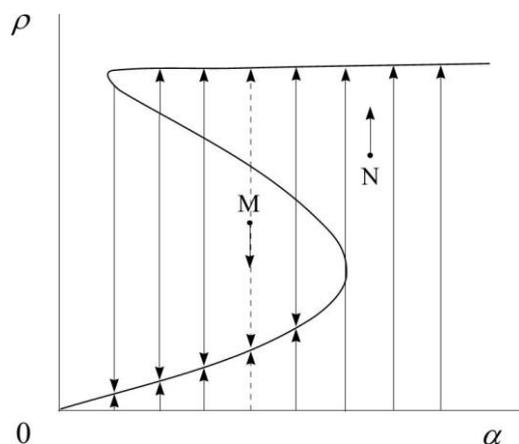


Рис. 13. График зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя, делящий плоскость ( $\rho$ ,  $\alpha$ ) на область распада (M) и область набора (N).

### 3. СКАЧКООБРАЗНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ПЛОТНОСТИ СЕЛОВОЙ МАССЫ ПРИ ЕЕ НЕОДНОЗНАЧНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОТ УКЛОНА ПУТИ ДВИЖЕНИЯ СЕЛЯ

Наличие отрицательного наклона у графика, характеризующего зависимость плотности селевой массы от минимального уклона, на котором селевая масса может существовать без распада и остановки (при глубине селевых потоков, представляющих практический интерес), свидетельствует о том, что с увеличением плотности селевой массы поток обретает способность увеличивать характеристики при уменьшении (до определенного предела) уклона пути его движения. Это объясняется существованием природного явления – скачкообразного увеличения плотности селевой массы при превышении уклоном пути движения селя критического значения (эффект Степанова) (Степанов Б.С., 1992).

Если анализировать эту зависимость, то скачкообразное изменение плотности означает, что при превышении критического значения уклона ( $\alpha_{кр1}$ ) (рис. 14, точка B) бесконечно малое увеличение уклона приводит к конечному изменению плотности

селевой массы (график претерпевает разрыв). Явление скачкообразного изменения плотности селевой массы при превышении уклоном критического значения не могло быть обнаружено экспериментальным путем, так как уменьшить уклон на бесконечно малую долю градуса невозможно. Оно было обнаружено теоретически. Скачкообразное изменение плотности не означает, что плотность селевой массы изменится мгновенно, для этого потребовалась бы бесконечно большая энергия и конечные (по величине) запасы селеформирующих пород на бесконечно малом (по размерам) участке пути движения селя.

На примерах, приведенных на рисунке 15 видно, что если на уклонах, соответствующих точке перехода линии в пунктир, плотность селевой массы была равна 1350...1370 кг/м<sup>3</sup>, то при увеличении уклона на бесконечно малую величину плотность станет (через какое-то конечное время, при наличии рыхлообломочных пород в русле, после продвижения селя на какую-то длину) близкой к предельно возможной (для гранулометрического состава Жаманкумских песков) – 2200 кг/м<sup>3</sup>.

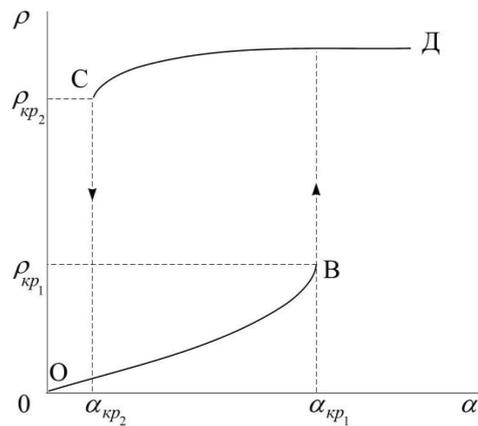


Рис. 14. Предельное значение плотности селевой массы для уклонов в области набора (см. рис. 13).

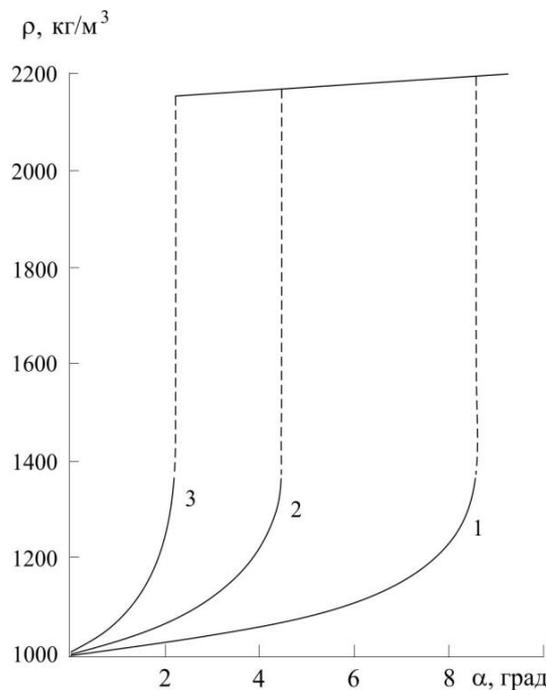
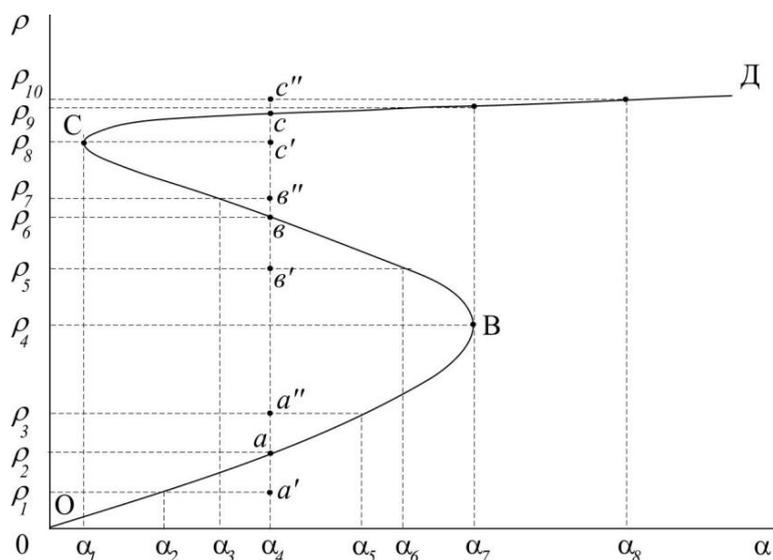


Рис. 15. Явление скачкообразного изменения плотности селевой массы при превышении уклоном критического значения при различных глубинах потоков: 1 – 0,5 м; 2 – 1 м; 3 – 2 м

**4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФИКА ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ СЕЛЕВОЙ МАССЫ ОТ ПУТИ ДВИЖЕНИЯ СЕЛЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ДАЛЬНЕЙШЕГО ХОДА СЕЛЕВОГО ПРОЦЕССА (УВЕЛИЧЕНИЯ ИЛИ УМЕНЬШЕНИЯ ПЛОТНОСТИ СЕЛЕВОЙ МАССЫ)**

В ходе селевого процесса, в результате изменения характеристик селя и его

пути движения, плотность селевой массы может существенно изменяться. На рисунке 16 представлена зависимость между плотностью селевой массы и минимальным уклоном (глубина потока постоянная, представляющая практический интерес), на котором она может существовать без распада и остановки, и приведены примеры, поясняющие как изменяется ход селевого процесса в различных ситуациях.



**Рис. 16.** Характерная форма кривой зависимости между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором она может существовать без распада и остановки

График ОВСД, характеризующий обобщаемую зависимость (для конкретных значений глубины потока, гранулометрического и минералогического составов твердой компоненты селевой массы), состоит из трех сегментов: ОВ и СД – сегменты устойчивого состояния селевой массы и ВС – сегмент неустойчивого состояния селевой массы.

Ход селевого процесса определяется тем, больше или меньше величина плотности селевой массы относительно значений плотности в точках, лежащих на кривой ОВСД при различных уклонах пути движения селя.

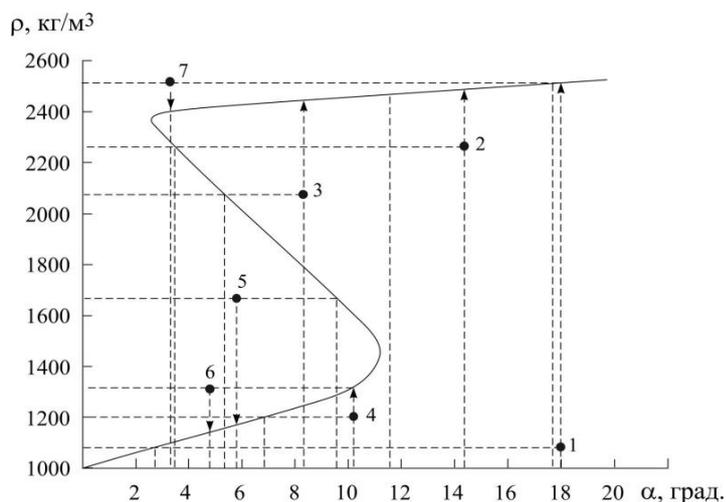
Например, уклону  $\alpha_4$  соответствуют точки  $a$ ,  $b$  и  $c$ , в которых энергия, необходимая для поддержания всех частиц во взвешенном состоянии, равна энергии потока, которую он может затрачивать на поддержание этих частиц в упомянутом состоянии.

Пусть, в силу каких-либо обстоятельств, на уклоне  $\alpha_4$  оказался сель с плотностью  $\rho_1$  (точка  $a'$ ), но сель с плотностью  $\rho_1$ , как это следует из рисунка, может существовать без остановки и распада на уклоне  $\alpha_2$ . Так как  $\alpha_2 < \alpha_4$ , избыточная энергия потока будет затрачена на увеличение плотности селевой массы до значения  $\rho_2$ . Подобный процесс будет происходить для всех значений плотности, больших нуля в интервале уклонов от нуля до  $\alpha_7$ , если плотность меньше значений, определяемых сегментом ОВ.

Пусть на уклоне  $\alpha_4$  оказался сель с

плотностью  $\rho_3$  (точка  $a''$ ), но поддержание плотности  $\rho_3$  требует энергетических затрат, существующих на уклоне  $\alpha_5$ . Поскольку  $\alpha_5 > \alpha_4$ , из-за недостатка энергии потока на уклоне  $\alpha_4$  произойдет частичный распад селевой массы до значения плотности  $\rho_2$ . Подобный процесс будет происходить для всех значений плотности (в интервале уклонов от нуля до  $\alpha_7$ ), если значения плотности больше значений сегмента ОВ, но меньше значений сегмента ВС. Обратная ситуация будет наблюдаться, если значения плотности селевой массы будут превышать значения (при соответствующих значениях уклонов), определяемые сегментом ВС, но будут меньше значений, определяемых сегментом СД. Превышение плотности, определяемой сегментом СД, будет приводить к частичному распаду либо остановке селей. Если в интервале уклонов от О до  $\alpha_1$  плотность селевой массы окажется меньше  $\rho_8$ , плотность селевой массы уменьшится до значения, определяемого сегментом ОВ.

Наличие графика зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя (рис. 17) и данных, необходимых для оценки селевого процесса (в частности данных об уклоне дальнейшего локального участка пути движения селя и плотности селевой массы в его начале), позволяет определять дальнейший ход селевого процесса.



**Рис. 17.** График зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селя

На рисунке 17 приведены график обсуждаемой зависимости и точки, координаты которых приведены в таблице 5, необходимые для определения хода селевого процесса.

В таблице приведены координаты фактической плотности селевой массы и уклона при пересечении с графиком, а также значения уклона, при котором не происходит распад и остановка селевой массы. Например, определим ход селевого процесса для точки 3. Проведем через точку 3 линию параллельную оси абсцисс. Эта линия пересекает график в точке, координаты которой 2080 кг/м<sup>3</sup> и 5,2°. Из этого следует, что сель с плотностью 2080 кг/

м<sup>3</sup>, находящийся на уклоне 8,3°, обладает избыточной энергией, которая может быть направлена на увеличение плотности селя. Определим ход селевого процесса для точки 5. Проведем через точку 5 линию параллельную оси абсцисс. Эта линия пересекает график в точке, координаты которой 1680 кг/м<sup>3</sup> и 5,8°. Из этого следует, что сель с плотностью 1680 кг/м<sup>3</sup> может существовать без частичного распада на уклоне 9,6°. Следовательно, энергии селя, находящегося на уклоне 5,8°, недостаточно для поддержания этой плотности, произойдет частичный распад селевой массы. Результаты прогноза хода селевого процесса в других ситуациях приведены в таблице 5.

Таблица 5

Координаты точек, используемых при оценке хода селевого процесса

№	Плотность фактическая, кг/м <sup>3</sup>	Уклон фактический, градус	Уклон достаточный (необходимый), градус	Ход селевого процесса
1	1080	18	2,5	Увеличение плотности
2	2250	14,4	3,4	Увеличение плотности
3	2080	8,3	5,2	Увеличение плотности
4	1200	10,2	7,0	Увеличение плотности
5	1680	5,8	(9,6)	Уменьшение плотности
6	1320	4,8	(10,2)	Уменьшение плотности
7	2510	3,2	(17)	Уменьшение плотности

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлена неоднозначная зависимость плотности селевой массы от уклона пути движения селя, на котором не происходят ее частичный распад или остановка. Выявление наличия отрицательного наклона у графика, описывающего зависимость между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором не происходит ее частичный распад или остановка, позволило теоретически обосновать существование природного явления – скачкообразного увеличения плотности селевой массы при превышении уклоном критического значения.

Открытие явления скачкообразного изменения плотности селевой массы имеет большое практическое значение, так как существующие математические модели, разработанные для выявления природы селей, не могут быть использованы для оценки селевых процессов, обусловленных изменением условий их протекания: формы и уклона русла, плотности селевой массы и расхода селя в результате его слияния с водным потоком, гранулометрического и минералогического составов селеформирующих пород, степени их увлажнения и т.д. Эти факторы, влияя на ход селевых процессов, определяют в пространстве и времени объем и расход селя, скорость его движения, плотность селевой массы и, следовательно, степень угрозы, создаваемой селем.

Индикатором состояния селевой массы является плотность. Таким образом, теория существования селевой массы является ключевым элементом при математическом моделировании селевых процессов, и позволяющим характеризовать селевой процесс от момента его зарождения до деградации, выражающейся в распаде селевой массы или ее остановке на относительно малых уклонах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Великанов М.А. Гидрология суши. – Л.: Гидрометеоздат, 1948. – 560 с.
2. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. – 385 с.
3. Марков И.Н., Бекаревич В.Е., Толстов М.И., Кострыгин Ю.Н. Некоторые сведения о двух гляциальных селевых потоках Заилийского Алатау // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1983. – №7. – С. 99–106.
4. Мостков М.А. Гидравлические закономерности в горных потоках // Селевые потоки и меры борьбы с ними. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 18–54.
5. Руководство по изучению селевых потоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 144 с.
6. Степанов Б.С. О механизме формирования селевых потоков // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1980. – №4. – С. 20–23.
7. Степанов Б.С. Экспериментальное исследование предельной плотности селевой массы // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1980. – №5. – С. 59–63.
8. Степанов Б.С. Явление скачкообразного изменения плотности селевой массы. Теоретическая и практическая значимость его открытия // Гидрометеорология и экология. – 2013. – №3. – С. 67–90.
9. Степанов Б.С. Явление скачкообразного изменения плотности селевых потоков. Заявка на открытие // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1992. – №12. – С. 141–169.
10. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Том 3. Селевые процессы и селетехнические сооружения. – Алматы, 2014. – 434 с.
11. Тихомиров Ю.П., Шевырталов Е.П. Некоторые характеристики гляциального селя, прошедшего в бассейне р. Сарканд // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1985. – №9. – С. 132–138.
12. Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 312 с.
13. Яфязова Р.К. Природа селей Заилийского Алатау. Проблемы адаптации. – Алматы, 2007. – 158 с.
14. Stepanov, B.S. and Yafyazova, R.K. (2017): Influence of Particles Fall Velocity, Archimedean's Force, and Depth of Debris Flow on a Relationship between Ultimate Density of Debris-Flow Mass and Channel Slope. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 10(2): 74–83.

REFERENCES

1. Velikanov M.A. Hidrologiya sushi. – L.: Hidrometeoizdat, 1948. – 560 s.
2. Gagoshidze M.S. Selevy`e yavleniya i bor`ba s nimi. – Tbilisi: Sabchota Sakartvelo, 1970. – 385 s.
3. Markov I.N., Bekarevich V.E., Tolstov M.I., Kostry`gin Yu.N. Nekotory`e svedeniya o dvukh glyaczial`ny`kh selevy`kh potokakh Zailijskogo Alatau // Selevy`e potoki. – M.: Hidrometeoizdat, 1983. – #7. – S. 99–106.
4. Mostkov M.A. Gidravlicheskie zakonomernosti v gorny`kh potokakh // Selevy`e potoki i mery` bor`by` s nimi. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1957. – S. 18–54.
5. Rukovodstvo po izucheniyu selevy`kh potokov. – L.: Hidrometeoizdat, 1976. – 144 s.
6. Stepanov B.S. O mekhanizme formirovaniya selevy`kh potokov // Selevy`e potoki. – M.: Hidrometeoizdat, 1980. – #4. – S. 20–23.
7. Stepanov B.S. E`ksperimental`ny`e issledovaniya predel`noj plotnosti selevoj massy` // Selevy`e potoki. – M.: Hidrometeoizdat, 1980. – #5. – S. 59–63.
8. Stepanov B.S. Yavlenie skachkoobraznogo izmeneniya plotnosti selevoj massy`. Teoreticheskaya i prakticheskaya znachimost` ego otkry`tiya // Hidrometeorologiya i e`kologiya. – 2013. – #3. – S. 67–90.
9. Stepanov B.S. Yavlenie skachkoobraznogo izmeneniya plotnosti selevy`kh potokov. Zayavka na otkry`tie // Selevy`e potoki. – M.: Hidrometeoizdat, 1992. – #12. – S. 141–169.
10. Stepanov B.S., Yafyazova R.K. Selevy`e yavleniya Yugo-Vostochnogo Kazakhstana: Tom 3. Selevy`e processy` i seletekhnicheskie sooruzheniya. – Almaty`, 2014. – 434 s.
11. Tikhomirov Yu.P., Shevy`rtalov E.P. Nekotory`e kharakteristiki glyaczial`nogo selya, proshedshego v bassejne r. Sarkand // Selevy`e potoki. – M.: Hidrometeoizdat, 1985. – #9. – S. 132–138.
12. Flejshman S.M. Seli. – L.: Hidrometeoizdat, 1978. – 312 s.
13. Yafyazova R.K. Priroda selej Zailijskogo Alatau. Problemy` adaptaczii. – Almaty`, 2007. – 158 s.
14. Stepanov, B.S. and Yafyazova, R.K. (2017): Influence of Particles Fall Velocity, Archimedean's Force, and Depth of Debris Flow on a Relationship between Ultimate Density of Debris-Flow Mass and Channel Slope. International Journal of Erosion Control Engineering, 10(2): 74–83.

**ҚҰРЫЛЫҚ ЖАҒДАЙЫ ТЫҒЫЗДЫҒЫНЫҢ ЭПОЗИТИВТІ ӨСУ ФЕНОМЕНИ – ОНЫҢ БӨУГЕ ТӘУЕЛДІЛІГІНІҢ НӘТИПЕСІ ҚОЗҒАЛУ ЖОЛДАРЫ**

**Б.С. Степанов<sup>1</sup> д.ғ.н., Р.К. Яфязова<sup>1</sup> д.т.н.**

<sup>1</sup>«Қазгидромет» РМК, Алматы, Қазақстан  
E-mail: bs.stepanov@gmail.com

Әрбір жергілікті сел көлемінің сипаттамалары сипаттамаларға байланысты үздіксіз өзгеріп отырады: оның қозғалу жолы (арнаның еңісі, ені және кедір-бұдыры), ағыс жыл-дамдығы, сел түзуге қатысатын борпылдақ сынық жыныстардың гранулометриялық және минералогиялық құрамы, тығыздығы, тұтқырлығы, және сел массасының пластикасы және т.б. Осы уақытқа дейін сел массасының тығыздығы сел жолының еңістігіне бір мәнді тәуелді екендігі жалпы қабылданған. Қазақ ғылыми-зерттеу гидрометеорология институтында (ҚазГМҒЗИ) жүргізілген тәжірибелік-теориялық зерттеулер нәтижесінде сел процесінің барысы ағынды сулардың ағынының суға түсуіне байланысты екені анықталды, сел массасының тығыздығы. Сел жолының көлбеуінен сел массасының тығыздығының анық еместігін анықтау табиғи құбылыстың – сел жолының еңістігінің критикалық мәнінен асқан кезде сел массасының тығыздығының күрт өзгеруінің ашылуына әкелді (Степанов әсері). Сел жолының еңісінен сел массасының тығыздығының анық еместігін есепке алу сел сипаттамаларын есептеудің негізгі элементі болып табылады.

**Түйін сөздер:** қоқыс ағыны, қоқыс ағыны, тығыздық, тұтқырлық, пластикалық, концентрация, тығыздық, көлбеу, ағын жылдамдығы, көлем, бірмәнді (бір мағыналы) тәуелділік

**THE PHENOMENON OF AN EPOSITIVE INCREASE IN THE DENSITY OF THE MURDER MASS – THE CONSEQUENCE OF ITS AMBIGUOUS DEPENDENCE ON THE SLOPE WAYS OF MOVEMENT**

**B.S. Stepanov<sup>1</sup>, R.K. Yafyazova<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>RSE «Kazhydromet», Almaty, Kazakhstan*

*E-mail: bs.stepanov@gmail.com*

The characteristics of each local volume of debris flow are continuously changing depending on the characteristics: a path of its movement (slope, width and roughness of channel), discharge, granulometric and mineralogical compositions of debris involved in debris-flow-formation, density, viscosity and plasticity of debris-flow mass, etc. Up to now, it believes that the debris-flow mass density depends unambiguously on the slope of path of a debris-flow. As a result of experimental and theoretical studies carried out at the Kazakh Research Hydrometeorological Institute (KazNIGMI), it was found that the course of the debris-flow process depends on the density of debris-flow mass. Identification of the ambiguity of the debris-flow mass density from the slope of the debris flow path led to the discovery of a natural phenomenon: an abrupt change of the density of debris-flow mass when the critical value of the slope of the debris flow path is exceeded (the Stepanov's effect). Taking into account the ambiguity of the debris-flow mass density from the slope of the debris flow path is a key element in computing debris flow characteristics.

**Keywords:** debris flow, debris-flow mass, density, viscosity, plasticity, concentration, pressure, slope, discharge, volume, unambiguous (ambiguous) dependence