

УДК 551.311(574)

Доктор геогр. наук

Б.С. Степанов *

Доктор техн. наук

Р.К. Яфязова

ЧТО ТАКОЕ СЕЛЬ?*СЕЛЬ, ВОДНЫЙ ПОТОК, НАНОСЫ, ОПОЛЗЕНЬ, КОНЦЕНТРАЦИЯ, ПЛОТНОСТЬ, ВЯЗКОСТЬ, ПЛАСТИЧНОСТЬ*

Катастрофический сель – сложный многофакторный процесс. Главными причинами селеформирования являются: климатическая, гидрометеорологическая, гляциологическая, геоморфологическая, почвенно-растительная, антропогенная и другие. Взаимодействие факторов в определенных ситуациях может приводить к тому, что главную роль играет фактор, который в других условиях является второстепенным.

Полстолетия оказалось достаточным для того чтобы катастрофическое природное явление из приданий старины далекой трансформировалось в науку о селях. Но этого срока не хватило для формулировки определения, что есть сель.

Многообразие эндогенных и экзогенных процессов, протекающих в различных климатических, геологических, геоморфологических и иных природных условиях, а также деятельность человека становятся причиной катастрофических явлений, угрожающих жизни и здоровью, а также хозяйственной деятельности человека. К таким явлениям относятся и сели.

Сель, сіль (арабск. – бурный поток) по определению Большой советской энциклопедии, – внезапно возникающий на горных реках бурный паводок, несущий очень большое количество наносов как в виде мелких частиц (грязевые сели), так и в виде гальки, валунов и глыб (грязекаменные сели) [1]. Существуют и другие определения селя (селевого потока) [6, 7, 9].

Слово «сель» (от сайль – «бурный поток») – арабского происхождения. Сель в Австрии – мур, в Швейцарии – руфф, в Германии – вильдбах, во Франции – торрент, в Индонезии – банджир, в Японии – ямацунами, в Перу – уайко и так далее [6].

* Казгидромет, г. Алматы

По определению, данному в терминологическом словаре «Селевые явления» «сель (селевой поток) – стремительный русловой поток, состоящий из смеси воды и обломков горных пород, внезапно возникающий в бассейнах небольших горных рек. Сель характеризуется резким подъемом уровня, пульсационным (волновым) движением, кратковременностью действия (преимущественно в пределах 1...4 часов, значительным эрозионно-аккумулятивным эффектом ...» [6].

Такое «современное» определение селя страдает очевидными недостатками.

При проведении экспериментов по искусственному воспроизведению селей начало зарождения селя происходит согласно плану работ. Время образования селя дождевого генезиса в очагах рассредоточенного селеобразования можно предсказать, имея информацию о продолжительности и интенсивности дождя.

Далеко не обязательно, что сель – бурный паводок. Так, во время селя 1975 г. на р. Улкен Алматы (Большая Алматинка) (Иле Алатау (Заилийский Алатау)) поток представлял собой относительно медленное движение плотной грязекаменной массы (0,64 м/с при уклоне 0,077; глубина потока 5,0...5,2 м; плотность селевой массы 2400...2500 кг/м³), оставлявшей на берегах четкие границы наивысшего уровня. Движение же селя 1973 г. на р. Киши Алматы (Малая Алматинка) было настолько бурным, что его поверхность скрывалась под облаком, состоявшим из мелких частиц грязи.

Сели образуются не только в горной местности, но и в равнинных пустынях. Продолжительность селей может изменяться от долей часа до (с перерывами) нескольких суток. Столь же различной (в зависимости от генезиса) может быть их повторяемость.

Катастрофическим селям при движении в горных долинах, как правило, недостаточно не только русла, но и поймы реки. Их руслом становится дно и борта долины. При выходе на конус выноса мощного грязекаменного селя, русло заполняется селевой массой и его влиянием на дальнейший характер отложения селевой массы можно пренебречь. Как правило, заново русло на конусе выноса формируется постселевым потоком (представленным разжиженной селевой массой) на новом месте.

Поведение селя определяется плотностью и реологическими свойствами селевой массы (упругостью, вязкостью, пластичностью), расходом и объемом селя, морфометрическими характеристиками пути его движения.

Продолжительность селевых процессов варьирует от нескольких минут до нескольких (с перерывами) суток. Расход селей изменяется от долей до нескольких десятков тысяч кубометров в секунду. Максимальный расход селевого потока 15 июля 1973 г. в бассейне р. Киши Алматы, по разным оценкам, составлял 5–10 тыс. м³/с [1, 2]. Плотность селевой массы, даже в течение одного процесса, колеблется в широком диапазоне – от 950 до 2400 кг/м³ и более (плотность массы лахара, в случае большой концентрации пемзы, может быть значительно меньше 950 кг/м³).

Твердый компонент селевой массы может состоять из частиц горных пород различного размера: от долей микрона до 10 м и более. Их плотность может изменяться в пределах от нескольких сотен (пемза) до 4000 кг/м³, плотность льда при 0 °С близка к 0,917 кг/м³.

Попытки классификации селей по вещественному составу селевой массы по составу субстрата («грязевой», «грязекаменный», «водокаменный», «наносоводный», не говоря уже о более «экзотических»: «льдо-водо-грязевой», «водо-древесно-каменный», «водно-пылеватый» и т.д.) и режиму движения («структурный», «турбулентный», «квaziламинарный» и т.п.) оказались неплодотворными. Реальное представление о вещественном составе селевой массы, ее реологических характеристиках и режиме движения потока может быть получено по данным о минералогическом и гранулометрическом составе (и других химических и физико-механических характеристиках) твердых частиц, их объемном (весовом) содержании в селевой массе, расходе селя и морфометрических характеристиках пути движения селя.

Широко распространенное представление о том, что глыбы (весом в несколько десятков тонн) транспортируются селом в большинстве ситуаций неверно. Перемещение крупных фракций твердого компонента в плотной селевой массе, обладающей пластичностью, даже на малых уклонах происходит за счет их потенциальной энергии.

Сель – поток, состоящий из трех компонент: твердой, жидкой и газообразной. Их объемное соотношение, а также гранулометрический и химический составы твердого компонента определяют плотность селевой массы и ее реологические свойства. Роль газообразного компонента становится значимой лишь при интенсивной деформации селевой массы, имеющей место при ее движении на больших уклонах. Количественные данные о его влиянии на реологические характеристики селевой массы (из-за сложности их экспериментального определения и малой практической значимости)

практически отсутствуют. Основное внимание при изучении свойств селевой массы уделяется твердому и жидкому компонентам.

В зависимости от размеров частиц, их минерального состава и соотношения твердого и жидкого вещества сели подразделяются на грязекаменные, грязевые, водокаменные, водоснежные, водолеяные и т.д. Еще относительно недавно к селям относили только грязекаменные потоки [4], о водоснежных и водолеяных селях не упоминается даже в научно-популярной книге Ю. Б. Виноградова «Этюды о селевых потоках» – книге, прочитав которую человек, любящий горы, уже навсегда при слове сель не останется равнодушным.

Сель настолько многообразное понятие, что охарактеризовать его только с помощью определений невозможно. Как минимум, для этого необходимы численные характеристики. Так, приблизительно 5000 лет назад на склонах вулкана Рейнир (США) в результате прорыва ледниковых вод сформировался сель с объемом, достигавшим 4 млрд. м³, прошедший по долине р. Уайт приблизительно 65 км [3].

Сель, начало которому, в результате землетрясения, положил обвал льда и скальных пород на склоне вершины Уаскаран (Перу), продвигался на 14-километровом участке со средней скоростью 110 м/с (396 км/ч) [3].

Плотность селевой массы (при плотности горных пород 2650 кг/м³) может превышать 2500 кг/м³. При этом вес породы в селевой массе в 24 раза превышает вес воды. Вязкость селевой массы может в миллионы раз превышать вязкость воды, совместное действие архимедовой силы и предельного напряжения сдвига (характеризующего пластичность селевой массы) приводит к тому, что глыбы горных пород не будут тонуть в окружающей их среде.

И как противоположность: плотность селевой массы может быть меньше плотности воды, вязкость – практически равной таковой воды, пластичность отсутствовать, скорость движения – менее 0,36 км/ч, объема селя – доли кубометра.

Сель, как природное явление, граничит с двумя природными явлениями: оползнями и водными потоками, транспортирующими твердый компонент. И если граница между оползнями и селями уверенно определяется визуально (движение оползней сопровождается разрывом их сплошности), то для того, чтобы отличить сель от водного потока, транспортирующего наносы, необходимо, как минимум, обладать критериями.

Если твердый компонент двухфазной смеси имеет плотность, значительно превышающую плотность воды, в качестве критерия, позволяющего отличить сель от водного потока, транспортирующего наносы, могут выступать пластичность, вязкость и плотность.

Пластичность двухфазной смеси в решающей мере определяется содержанием глинистых фракций в гранулометрическом составе твердого компонента и их химическим составом. В подавляющем числе селеформирующих грунтов содержание глинистых фракций мало, поэтому (если объемная концентрация твердого компонента в селевой массе меньше 0,5), пластичность селевой массы практически не влияет на сопротивление движению потока и на энергию, затрачиваемую на поддержание твердого компонента во взвешенном состоянии (под взвешенным состоянием понимается отсутствие кулоновского трения частицы с поверхностью, по которой движется селевая масса), и, следовательно, пластичность не может быть использована в качестве критерия, позволяющего отличить сель от водного потока, несущего наносы.

Вязкость селевой массы неоднозначно зависит от ее плотности и определяется объемной концентрацией твердого компонента, а также его минералогическим и гранулометрическим составами. Поскольку роль вязкости в динамике потока определяется соотношением сил инерции и вязкости, использовать значение вязкости двухфазной смеси с целью идентификации потока (сель или водный поток, транспортирующий наносы) затруднительно.

Привлекательным (для этой цели) кажется энергетический критерий. Движение жидкого и твердого компонентов селевой массы определяется изменением их потенциальной энергии за единицу времени.

Если

$$m_B g v_B \sin \alpha > m_T g v_T \sin \alpha ,$$

где m_B – масса жидкого компонента (воды), m_T – масса твердого компонента, v_B – средняя поступательная скорость жидкого компонента, v_T – средняя поступательная скорость твердого компонента, α – угол наклона пути движения селевой массы, g – ускорение свободного падения, то это водный поток, транспортирующий наносы, в противном случае – сель.

Твердый компонент в составе двухфазной смеси может перемещаться (вследствие ее перемешивания и отсутствия свойства пластичности) во взвешенном состоянии, сальтацией, качением и скольжением. Од-

нако только при перемещении твердого компонента во взвешенном состоянии его скорость может приближаться к скорости движения жидкого компонента, так как перемещение твердого компонента путем сальтации, качения и скольжения (на уклонах менее 0,17) происходит, когда скорость движения жидкого компонента превышает скорость твердого компонента.

Если скорости движения твердого и жидкого компонентов равны, а это (при относительно малой концентрации твердого компонента в смеси) имеет место, когда твердые частицы перемещаются во взвешенном состоянии, то равенство изменения их потенциальных энергий наступает при равенстве масс компонентов.

Для единичного объема смеси жидкого и твердого компонентов

$$\begin{aligned} m_T &= C\rho_T, \\ m_B &= (1 - C)\rho_B, \\ C &= \frac{\rho_B}{\rho_T + \rho_B}, \end{aligned}$$

где ρ_T – плотность твердого компонента, ρ_B – плотность жидкого компонента, C – объемная концентрация твердого компонента в двухфазной смеси.

При $\rho_T = 2650 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$, $C = 0,274$, а плотность селевой массы $\rho_{см} = \rho_T C + \rho_B(1 - C) = 1452 \text{ кг/м}^3$.

Следовательно, при принятых значениях ρ_T и ρ_B плотность двухфазной смеси ($\rho_{см}$), равная 1452 кг/м^3 , является максимально возможной, при которой энергия водной составляющей равна или превышает энергию, затрачиваемую твердым компонентом на движение потока.

Однако эта гипотеза обладает существенными недостатком. При полидисперсном составе твердого компонента перемещение частиц может происходить и путем скольжения, качения, сальтации. В такой ситуации доля энергии, затрачиваемой на перемещение упомянутых частиц (за счет изменения их потенциальной энергии в единицу времени),

$$\Delta W_{II} = g \sin \alpha (m_{ck} v_{ck} + m_k v_k + m_{cl} v_{cl}),$$

где m_{ck} и v_{ck} – масса и скорость частиц, перемещающихся скольжением,

m_k и v_k – масса и скорость частиц, перемещающихся качением, m_{cl} и v_{cl}

– масса и скорость частиц, перемещающихся сальтацией.

К сожалению, осуществить измерение масс и скоростей движения этих частиц при проведении производственных работ невозможно. Следо-

вательно, равенство энергий твердого и жидкого компонентов не может быть принято в качестве критерия, позволяющего отличить водный поток, транспортирующий наносы, от селя.

Не менее сложной является проблема идентификации двухфазных потоков, когда твердый компонент представлен льдом, плотность которого меньше плотности воды. В гидрологии такие потоки (с плотностью менее 1000 кг/м^3) получили названия шугоход и ледоход. Их определения даны в Гидрологическом словаре [8]. Природа шугоходов и ледоходов изучена в степени, позволяющей с достаточной предупредительностью и оправдываемостью их прогнозировать.

В последние десятилетия наблюдаются и изучаются водоснежные и водолеяные сели. Их определения даны в Гляциологическом словаре [5] и терминологическом словаре «Селевые явления» [6]. Механизмы их образования просты, возможно, поэтому им не нашлось «места» в Гидрологическом словаре.

В 2006 г. был описан механизм формирования водолеяного селя, который связан с лавинообразным разрушением водолеяных образований, формирующихся при резком понижении температуры воздуха ($-10 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже) в отсутствие ледяного покрова на горных реках, продольный уклон русла которых составляет $2...7^\circ$, т.е. на склонах, на которых расположены населенные пункты с сотнями тысяч человек.

Природа селей многообразна, однако если сели формируются на склонах вулканов, селеведы всех континентов называют их лахарами. Одним из «продуктов» извержения вулканов является пемза – пористое вулканическое стекло, образующееся в результате выделения газов при быстром застывании кислых и среднекислых лав. Плотность пемзы $2000...2500 \text{ кг/м}^3$, но из-за замкнутости большинства пор объемная плотность пемзы может изменяться в пределах $300...900 \text{ кг/м}^3$. При большой концентрации пемзы в смеси с водой, ее плотность может быть значительно меньше плотности смеси воды и льда. Однако вряд ли потоку такой смеси будет отказано называться лахаром, т.е. селем. Следовательно, плотность смеси жидкого и твердого компонентов не является критерием отличия селя от водного потока, транспортирующего наносы.

В научно-популярной книге «Этюды о селевых потоках» Ю.Б. Виноградов в разделе «Селевики и селеведение, терминологические дебри, классификационная эпидемия» пишет «В 1947 г. по инициативе президента Академии наук СССР С.И. Вавилова была организована селе-

вая комиссия. ... 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». Возвращаясь к этой проблеме, в разделе «Шутят не только физики» Ю.Б. Виноградов пишет: «Рассказывают, что первый председатель Селевой комиссии член-корреспондент АН СССР Михаил Андреевич Великанов на одном из вещаний сказал:

– А главную задачу – дать определение «что такое сель», – Академия наук берет на себя» [3].

За прошедшее полувековье эта задача так и не решена, что приводит к трагическим последствиям из-за того, что водоледяные сели не прогнозировались. Так, в 2004 г. в центре г. Каскелен в водоледяной сель попал мальчик. В 2006 г. во время прохождения водоледяного селя по территории населенного пункта Фабричный (при температуре воздуха около -20°C) погибли люди.

Угрозу здоровью и жизни людей, большой материальный ущерб наносят как водные потоки, так и сели. Принципиальным отличием селей от катастрофических водных потоков является относительно большое содержание в них твердого компонента. Но, как мы уже убедились, зависимость физических характеристик селевой массы от концентрации твердого компонента носит непрерывный характер и, поэтому, они не могут быть использованы в качестве критерия, позволяющего отличить сель от водного потока, транспортирующего наносы.

Так, может быть, в качестве такого критерия использовать социально-экономический критерий: если основной ущерб нанесен твердым компонентом, то это – сель, а если водой – паводок, несущий наносы? Недостатки этого критерия очевидны

Так что же такое сель?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большая советская энциклопедия. – М.: Большая советская энциклопедия, 1955. – Т. 38. – 668 с.
2. Боровинский Б.А. Электроразведочные работы на морене Малоалма-тинских ледников // Гляциологические исследования в период МГТ:

- Заилийский и Джунгарский Алатау. – Алма-Ата: АН КазССР, 1961. – Вып. 1. – С. 113–135.
3. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 144 с.
 4. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. – 386 с.
 5. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 528 с.
 6. Перов В.Ф. Селевые явления. Терминологический словарь. – М.: МГУ, 1996. – 45 с.
 7. Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 312 с.
 8. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 308 с.
 9. Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. – М.: Недра, 1980. – 296 с.

Поступила 27.08.2015

Геогр. ғылымд. докторы Б.С. Степанов
Техн. ғылымд. докторы Р.К. Яфязова

СЕЛ ДЕГЕНІМІЗ НЕ?

Апаттық сел – күрделі көпфакторлы процесс. Селдің қалыптасуының негізгі себептері: климаттық, геоморфологиялық, топырақ-өсімдік, антропогендік және басқалар. Белгілі жағдайларда факторлардың өзара әрекеттесуі бір фактордың негізгі ролі, басқа жағдайда көмекші болуы мүмкін.

Алыс ескінің ениісінен сел туралы ғылымға апаттық табиғи құбылыстардың ауысуына жарты жүзжылдық жеткілікті болды. Бірақ осы уақыттың өзі, сел бар екеніне анықтама құрастыруға жетпеді.