

УДК 551.311

Доктор геогр. наук Б.С. Степанов *
Доктор техн. наук Р.К. Яфязова

СДВИГ ПАРАДИГМЫ – ЭТАП РАЗВИТИЯ СЕЛЕВЕДЕНИЯ

ТЕОРИЯ, РЕОЛОГИЯ СЕЛЕВОЙ МАССЫ, ПРОГНОЗ СЕЛЕЙ, МЕХАНИЗМЫ СЕЛЕФОРМИРОВАНИЯ, ГЕНЕЗИС КОНУСОВ ВЫНОСА, ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА, СЕЛЕВАЯ АКТИВНОСТЬ

В статье приведены основные положения, господствовавшие, по мнению авторов, до 70-х годов 20 века и положения, которые приводят к необходимости сдвига существующей парадигмы.

«Возможно, что в мире мысли, как и в материальной природе, нет произвольного зарождения, а существует только развитие, эволюция; что современная мысль возникает на неосознаваемом фоне идей, переданных нам предшествующими поколениями».

Н.А. Умов (*из речи, посвящённой 300-летию со дня рождения Декарта*)

Интерес к селевым явлениям возник в результате значительного увеличения ущерба, наносимого селями в ходе освоения горных территорий в Западной Европе во второй половине 19 века. Возрастание селевой активности было связано главным образом с истреблением лесов. Уже в первых публикациях по селевой проблематике обсуждаются как вопросы природы селей, так и способы уменьшения ущерба, наносимого ими. К изучению природы селей в 20 веке подключились ученые различных специальностей.

Селеведение зародилось и развивается на стыке многих наук. К основным из них в настоящее время можно отнести гидрологию, метеорологию, геологию, геоморфологию, гляциологию, геокриологию, биологию, почвоведение, физику, реологию, физическое и математическое моделирование, инженерные дисциплины и т.д. Многим из этих наук нет и 100 лет, часть из них отпочковалась от более «древних» наук, а часть – имеет нескольких «родителей».

* Казгидромет, г. Алматы

Многогранность и сложность селевых процессов, отсутствие системного подхода к их изучению привели к выделению двух категорий селей:

грязекаменный сель (грязекаменный поток, структурный грязевой поток, связный селевой поток, гидродинамический селевой поток и др.);

наносоводный сель (турбулентный селевой поток, несвязный селевой поток).

Сложилось устойчивое представление о том, что грязекаменные сели образуются в результате потери устойчивости аномально увлажненными грунтовыми массивами (сейсмическое воздействие, разжижение при выпадении интенсивных и продолжительных осадков, изменение физических характеристик грунта в процессе медленной их трансформации, вызванной изменением влажности, структуры, мощности (толщины) грунта и т.д.). Поскольку эти процессы имели много общего с оползнями, грязекаменные сели изучались преимущественно геологами, геоморфологами и гидротехниками.

Для грязекаменных селей не существовало проблемы определения предельно возможной плотности селевой массы: априори считалось, что концентрация твердого компонента в селевой массе не может превышать значения, при котором селевая масса теряет свойство текучести (деформация селевой массы сопровождается потерей сплошности среды). Значение максимальной плотности зависит от минералогического и гранулометрического составов рыхлообломочных пород, принимающих участие в селеобразовании.

Гидрологи, изучавшие процессы транспорта наносов водными потоками, «курировали» наносоводные сели. Разработанная М.А. Великановым гравитационная теория позволила обосновать процесс переноса крупных частиц во взвешенном состоянии за счет турбулентного перемешивания в потоке, представленном смесью воды и твердых частиц. Находясь под влиянием представлений о том, что при концентрации твердого компонента большей 50 % турбулентность исчезает, М.А. Великанов ограничил область применимости своей теории объемной концентрацией 0,40...0,42. При таких и более низких концентрациях (а также без учета того, что скорость стесненного падения частиц может быть намного меньше гидравлической крупности частицы) зависимость плотности селевой массы от уклона русла носит однозначный характер.

Считалась возможной трансформация грязекаменных селей в наносоводные (например, при смешении грязекаменных селей с водными потоками), обратная трансформация исключалась.

Революционные изменения в понимании природы селей произошли после проведения экспериментов по искусственному воспроизведению селей в натуральном масштабе Казахским научно-исследовательским гидрометео-

рологическим институтом на Шамалганском полигоне в период 1972...1978 гг. В этих экспериментах сосредоточенный водный поток в эволюционном режиме трансформировался в наносоводный сель, а затем наносоводный сель – в грязекаменный. Водный паводок с расходом около $25 \text{ м}^3/\text{с}$ трансформировался в грязекаменный сель с максимальным расходом до $420 \text{ м}^3/\text{с}$ и плотностью селевой массы около $2400 \text{ кг}/\text{м}^3$. Максимальный продольный уклон естественного селевого очага, образовавшегося в результате опорожнения поверхностного водоёма, не превышал 21° . Максимальные размеры глыб, принимавших участие в селеобразовании, достигали 8 м.

Результаты киносъемки процесса трансформации водного потока в плотный грязекаменный сель и данные о динамике состоянии увлажнения селеформирующих грунтов свидетельствовали о преобладающей роли эрозии и перемешивания в образовании селевой массы.

Анализ условий образования селей в природных условиях: 1973 г. (р. Малая Алматинка (Киши Алматы)), 1977 г. (р. Большая Алматинка (Улкен Алматы)), 1982 г. (р. Сарыкан, Жетысу Алатау), расход которых достигал 10 тыс. $\text{м}^3/\text{с}$, а плотность была близка к $2400 \text{ кг}/\text{м}^3$, подтвердил результаты, полученные при воспроизведении искусственных селей. Максимальный продольный уклон селевого очага на р. Сарыкан не превышал 12° .

Полная несостоятельность селевой парадигмы (совокупности теоретических и методологических положений, принятых научным сообществом на известном этапе развития науки и используемых в качестве образца, модели, стандарта для научного исследования, интерпретации, оценки и систематизации научных данных, для осмысления гипотез и решения задач, возникающих в процессе научного познания), исповедовавшейся на протяжении полувека, проявилась после формирования селя 1988 г., образовавшегося в результате прорыва накопителя сточных вод, созданного близ г. Алматы в пустыне Жаманкум. Существовавшая ранее теория транспорта наносов во взвешенном состоянии оказалась неспособной объяснить, каким образом водный поток с объемом 36 млн. м^3 смог переместить практически такой же объем песка на уклоне менее одного градуса на десятки километров.

Новая парадигма отвечает на множество вопросов, представляющих не только большой научный, но и практический интерес.

– Каков минимальный уклон очага селеформирования (не ограниченного по длине, для различного гранулометрического состава селеформирующих грунтов и расхода водного потока), при котором селевая масса будет иметь плотность, близкую к пределу текучести?

– Что будет происходить с селом, сформировавшимся на большом уклоне (при ограниченной длине селевого очага) при его перемещении на относительно меньший уклон?

– Что будет происходить с грязекаменным селом, при его слиянии с водными потоками, на различных уклонах?

В первом приближении установлено, как изменяется эродирующая способность селевой массы в зависимости от ее плотности и гранулометрического состава твердого компонента, как изменяется устойчивость грунта к эрозии в зависимости от величины сцепления рыхлообломочных пород. Решена задача по определению относительной селевой активности речных бассейнов. Установлена ключевая роль климата в селевой активности в горных районах средних широт с континентальным климатом, несущих оледенение в условиях климата 20 века.

Необходимо разработать методы расчета характеристик селей в условиях изменения регионального климата вследствие глобального потепления. Разработать теорию изменения эродирующей способности селевой массы от ее плотности и гранулометрического состава твердого компонента, теорию изменения устойчивости грунта к эрозии в зависимости от его минералогического и гранулометрического составов и влажности. Выявить закономерности частичного распада селевой массы в зависимости от гранулометрического состава твердого компонента селевой массы и ее реологических характеристик и многие задачи, связанные с отложением селей на конусах выноса и в селехранилищах, а также перелива селевой массы через гребень селехранилищ и т.д.

Смена парадигм (англ. paradigm shift) – термин, впервые введенный историком науки Томасом Куном в книге «Структура научных революций» (1962 г.) для описания изменения базовых посылок в рамках ведущей теории науки (парадигмы). В развитии науки Т. Кун различает три цикла.

– Нормальная наука. Каждое новое открытие поддается объяснению с позиций господствующей теории.

– Экстраординарная наука. Кризис в науке. Появление аномалий – необъяснимых фактов. Увеличение количества аномалий приводит к появлению альтернативных теорий. В науке сосуществует множество противоборствующих научных школ. «Решение отказаться от одной парадигмы всегда одновременно есть решение принять другую парадигму, а приговор, приводящий к такому решению, включает как сопоставление обеих парадигм с природой, так и сравнение парадигм друг с другом» [17].

– Научная революция. Научная дисциплина меняет одну парадигму на другую. По терминологии Т. Куна, это называется «научной

революцией» или «сдвигом парадигмы». Зачастую в качестве силы убеждения выступает само время и естественное исчезновение носителей старого убеждения. Т. Кун в данном случае цитирует М. Планка: «... новая научная истина не достигает триумфа путем убеждения своих оппонентов и их просветления, но это, скорее, происходит оттого, что ее оппоненты в конце концов умирают и вырастает новое поколение, с ней знакомое» [17].

Ниже, в форме удобной для сравнительного анализа, сформулированы: парадигма, главенствовавшая в селеведении до экспериментов по воспроизведению искусственных селей на Шамалганском полигоне, и парадигма, разрабатываемая в последнюю четверть 20 века, а также в первой четверти 21 века.

Старая парадигма	Новая парадигма
<p>Роль селей в переносе рыхлых отложений недооценивалась.</p>	<p>«Сели следует рассматривать как важнейший природный механизм перемещения рыхлых отложений в горных странах с верхних на нижние уровни накопления» К.С. Лосев [25].</p>
<p>В монографиях, претендовавших на «современные» представления о природе селевых явлений, сель определялся как:</p> <p>И.В. Боголюбова (1957 г.): «Сель – это кратковременный, большой разрушительной силы паводок с очень высоким (до 50...60 % от общего объема) содержанием наносов» [2].</p> <p>С.М. Флейшман (1951 г.): «Селевыми потоками (селями) называют горные паводки, несущие большое количество твердого материала ...» [42].</p> <p>М.С. Гагошидзе (1971 г.): «Турбулентные сели (селевые паводки) формируются исключительно при ливневых осадках, в результате размыва селевой массы в селеобразующих очагах или се-</p>	<p>Сель – поток смеси воды и частиц горных пород, в котором движение твердой составляющей обусловлено изменением ее потенциальной энергии.</p> <p>При достаточных значениях энергии и градиента энергии рельефа, содержания глинистых фракций в селеформирующих породах, дисперсии размеров частиц (и их содержания в гранулометрическом составе селеформирующих пород), а также глубины потока плотность селевой массы, ее вязкость и предельное напряжение сдвига будут возрастать до значений, при которых селевая масса потеряет свойство текучести (способность деформироваться без нарушения сплошности селевой массы).</p> <p>Режим движения селя (квази-</p>

<p>левых отложений в русле горного водотока ... Объемный вес грязекаменной массы турбулентного селя 1,1...1,3 т/м³. ... Структурный поток движется подобно пластическому квазитвердому телу, скользящему по руслу при больших уклонах, без каких-либо внутренних подвижек. ... Объемный вес структурной селевой массы меняется в пределах от 1,9 до 2,3 т/м³» [9].</p> <p>А.И. Шеко (1980 г.): «Сель – один из генетических типов экзогенных геологических процессов, который занимает промежуточное положение между обычным паводком с небольшим содержанием взвешенных и влекомых наносов, с одной стороны, и оползнями-потоками, с другой стороны [47].</p>	<p>ламинарный, квазитурбулентный, «структурный») определяется плотностью селевой массы и ее реологическими характеристиками, глубиной потока и уклоном пути движения.</p>
<p>Грязекаменные потоки большой плотности (2200 кг/м³ и более) при взаимодействии водных потоков с рыхлообломочными породами не формируются. «Характерной особенностью структурного селевого потока является способность его к трансформации в турбулентный селевой поток ... В то же время, обратный переход паводка (селевого или водного) в структурный селевой поток ... при незначительных уклонах русла не может иметь место» [9].</p>	<p>Одним из важнейших результатов экспериментов по искусственному воспроизведению селей на Шамалганском полигоне является доказательство возможности формирования плотных грязекаменных селей в результате взаимодействия водных потоков с рыхлообломочными породами, вмещающими русло. В этом процессе решающая роль принадлежит эрозии [31]. Влияние сдвиговых процессов (при условии аномального увлажнения рыхлообломочных пород) увеличивается по мере углубления русла и со временем может стать преобладающей [38].</p>
<p>Преобладало мнение о преимущественной роли энергии воды в переносе наносов («вода транс-</p>	<p>Результаты анализа экспериментов по воспроизведению искусственных селей на Шамалганском</p>

<p>портирует»). Не исключено, что корни этого мнения – результаты вычисления М.А. Великановым энергии, которая затрачивается р. Волгой при переносе наносов от ее истока до Каспийского моря, и которая многократно превышает величину изменения потенциальной энергии наносов [4].</p>	<p>полигоне свидетельствуют о том, что средняя скорость движения водной и твердой составляющих селевой массы равны. В такой ситуации равенство энергий водной и твердой составляющих селевой массы наступает при ее плотности, равной 1452 кг/м³ (объемная концентрация $C = 0,27$). Следовательно, при большой плотности (концентрации твердой составляющей) селевой массы вода выступает не в роли источника энергии, обеспечивающего транспорт твердой составляющей селевой массы, а составляющей, придающей селевой массе свойство текучести.</p>
<p>Механизм вовлечения в процесс селеформирования крупных фракций гранулометрического состава рыхлообломочных пород (крупных камней, глыб) в результате взаимодействия водных потоков с руслом не был известен.</p>	<p>Водный поток размывает и уносит рыхлообломочные породы, окружающие глыбы. Располагаясь на относительно больших уклонах (более 12°), глыбы обретают возможность самостоятельно катиться (скользить, перемещаться скачками) со скоростью, превышающей скорость движения селевого потока [16].</p>
<p>Преобладало мнение о том, что скорость течения воды (суспензии), как составной части селевой массы, существенно превышает скорость движения относительно крупных частиц. Благодаря разности скоростей и осуществляется транспорт крупных частиц [23].</p>	<p>Результаты киносъемки головной части селей (формировавшихся во время экспериментов на Шамалганском полигоне) после прохождения ими 700-метрового участка русла, образованного в коренных породах и не содержавшего значимых объемов отложений предшествовавших селей, свидетельствуют об отсутствии потока воды (суспензии) перед головной частью селей, концентрация крупных фракций гранулометрического состава селеформирующих пород в которых, была аномально высокой.</p>

<p>Считалось, что в условиях высокогорья концентрация поверхностного дождевого стока происходит в отрицательных формах рельефа, образованных в коренных и рыхлообломочных породах, в зоне контакта скал и льда (кулуар, межсклоновая ложбина и т.д.). Там же может происходить накопление селеформирующих рыхлообломочных пород. Если расход поверхностного водного потока превышает критическое значение, взаимодействие водного потока с рыхлообломочными породами приводит к формированию относительно небольшого селя, смещение которого с дождевым паводком в крупном селевом очаге инициирует формирование мощного селя [46].</p>	<p>Установлено, что в процессе заполнения отрицательных форм рельефа рыхлообломочными породами происходит формирование подземных каналов стока. Эти каналы образуются путем выноса относительно мелких фракций бытовыми потоками, возникающими при выпадении ординарных дождей и таянии снега. После того, как канал приобретет сечение, пропускающее ординарные паводки (со свободой поверхностью), дальнейшее заполнение отрицательных форм рельефа происходит без выноса мелких фракций.</p> <p>Выпадение экстраординарных осадков сопровождается образованием паводков, пропустить которые подземный канал в безнапорном режиме не способен. Движение паводка в напорном режиме приводит к обводнению рыхлообломочных пород, расположенных вокруг канала стока. Превышение сдвигающих сил над удерживающими приводит к сдвигу водонасыщенных пород, их разжижению и образованию селей.</p> <p>Описанный подготовительный механизм селеформирования и собственно селеобразование имеют значительные преимущества (как механизм переноса рыхлообломочных пород из относительно верхнего яруса на более низкий) перед эрозийным механизмом:</p> <p>Напорный режим движения воды в подземном канале стока</p>
---	---

	<p>начинается при меньшей интенсивности осадков, нежели это необходимо для того, чтобы расход поверхностного стока превысил критическое значение.</p> <p>При наличии напора обводнение происходит быстрее, нежели путем инфильтрации с поверхности грунта.</p> <p>Наличие напора уменьшает величину нормального давления сдвигающегося тела, поэтому сдвиг может происходить на меньших уклонах [35].</p>
<p>Водоледяные потоки – «... один из видов селевых потоков, в селевой массе которых твердая составляющая представлена обломками льда с участием снега и обломков горных пород ... Водолеяные сели бывают ледникового и речного генезиса. Ледниковые сели образуются в результате срыва ледяных масс, насыщенных трещинными водами (ледник Колка, 1902, 2002 гг.; ледник Уаскаран, Перу 1962, 1970 гг.)».</p> <p>Водолеяные сели речного генезиса «... образуются в период зимних оттепелей вследствие срыва ледяных порогов из донного льда или прорывов снежных завалов, созданных лавинами. Твердая составляющая потока формируется, помимо тел ледяных порогов и снежных завалов, за счет снежно-ледяного покрова, наледей, шуги, русловых отложений» [10, 26].</p>	<p>Установлено существование не описанного ранее водолеяного селя речного генезиса, характерной особенностью которого является возникновение в период сильных похолоданий, которым предшествовал теплый период, препятствовавший возникновению ледяных образований (забереги, внутриводный лед, загоры, наледи, ледяной покров и т.д. [36, 50]. В такой ситуации при температуре минус 15 °С и более низких температурах на горных реках, продольный уклон русел которых лежит в пределах 2...7°, за относительно короткий промежуток времени (3...5 суток) возникают водолеяные образования высотой 1,5...3 м и более. Расход воды в реке (вследствие образования льда) уменьшается. При равенстве расхода воды пропускной способности каналов в теле упомянутого образования уровень воды стабилизируется, образуется ледяной покров. Русловые и пойменные запасы воды при</p>

	<p>этом намного превышают запасы, возникающие при дождевых паводках малой обеспеченности.</p> <p>Ледяной покров, из-за низкой теплопроводности, уменьшает теплообмен между водой и холодным воздухом. Расход воды из-за уменьшения образования льда увеличивается, движение воды происходит не только под действием силы тяжести, но и вследствие появления напора. По мере увеличения площади ледяного покрова величина напора возрастает.</p> <p>Увеличение температуры и напора воды приводит к ослаблению прочности водолеяных образований и к разрушению одной из них. Водолеяная масса обрушивается на ниже-расположенное водолеяное образование и т.д., расход потока, поддерживаемый изливанием пойменных вод (которые могут рассматриваться как рассредоточенные притоки) лавинообразно возрастает. Как показали наблюдения за образованием водолеяного селя на р. Узынкаргалы в 2006 г., на участке длиной около 500 м расход потока увеличился в 50...100 раз.</p> <p>Прохождение водолеяного селя по территории поселка Фабричный имело трагические последствия [50]. Подобные сели образуются в последние десятилетия на р. Каскелен практически ежегодно. На территории г. Алматы водолеяные сели формировались в конце 19 и во второй половине 20 веков.</p>
<p>Даже в 80-е годы 20 века реология селевой массы находилась в</p>	<p>В настоящее время доказано, что селевая масса обладает фунда-</p>

<p>зачаточном состоянии: селевой массе приписывались «поддерживающая сила», «угол естественного откоса», «угол растекания» [9].</p>	<p>ментальными реологическими свойствами: упругостью, вязкостью и пластичностью. Разработаны методы измерения и определения этих свойств с учетом влияния частиц всех размеров.</p>
<p>Практически отсутствовали сведения о полном гранулометрическом составе селеформирующих горных пород.</p> <p>Минералогическому и гранулометрическому составам селеформирующих пород не уделялось должного внимания.</p>	<p>Проведены массовые измерения гранулометрического состава, а также минералогического состава глинистых фракций селеформирующих пород в различных физико-географических условиях [3].</p>
<p>При определении реологических характеристик селевой массы оперировали средними значениями размеров частиц [40]. В эмпирических формулах фигурировали «средние» размеры частиц (и это тогда, когда размеры частиц составляли от долей микрона до 10 и более метров). Полученные данные имели, в лучшем случае, региональную значимость.</p>	<p>Гранулометрический состав селеформирующих пород и их содержание в селевой массе определяют ее вязкость [34].</p> <p>Минералогия глинистых фракций гранулометрического состава селеформирующих пород (а также гумус), их содержание в смеси с водой и более крупными фракциями в решающей мере определяют пластичность селевой массы [8].</p> <p>Разработаны методы измерения и определения реологических характеристик селевой массы с учетом влияния частиц всех размеров [8, 34].</p>
<p>Отрицалось воздействие архимедовой силы на наиболее крупные фракции гранулометрического состава, находившиеся в смеси воды и относительно мелких частиц: «... в силу явления коллоидно-структурного порядка, само понятие взвешивающей способности, в архимедовом смысле этого слова, теряет всякое значение ...» [9].</p>	<p>На крупные частицы гранулометрического состава твердой составляющей селевой массы действует архимедова сила, равная весу вытесненной селевой массы, состоящей из воды и относительно мелких частиц [34].</p>

<p>«В результате образования заторов и последующих их прорывов селевой поток часто движется валами или волнами ...» [43].</p> <p>«... крупные камни, для передвижения которых естественных скоростей селевого паводка недостаточно, и они передвигаются лишь под действием повышенных скоростей и давлений, образующихся при прорыве потоком временных нагромождений камней. ... такое прерывное движение каменной селевой массы селея ... характерно для всех селей грязекаменного и водно-каменного состава» [4].</p>	<p>Валы (волны) формируются без образования заторов и являются закономерностью, присущей селеобразованию. [6, 11, 22, 37].</p> <p>Их образование наблюдалось при проведении Шамалганских экспериментов по искусственному воспроизведению селей на уклонах 15...17°, что исключает существенное накопление селевой массы даже за наиболее крупными глыбами.</p> <p>При относительно больших уклонах пути движения и малой плотности вмещающей среды крупные глыбы самостоятельно перемещаются качением. На малых уклонах и большой плотности вмещающей среды крупные глыбы перемещаются (под действием силы тяжести) во взвешенном состоянии или скольжением благодаря действию архимедовой силы и пластическим свойствам вмещающей среды, уменьшающими нормальное давление. Как правило, глыбы останавливаются, когда их размеры превышают уровень вмещающей их среды (поскольку на выступающую над потоком часть глыбы не действует архимедова сила, сила трения резко увеличивается).</p>
<p>«В части содержания наносов цифровых материалов почти не имеется. В литературе имеется таблица, составленная австрийским геологом Штини, но о достоверности данных, положенных в основу этой таблицы судить весьма трудно. Все же мы приводим выборку из</p>	<p>Если уклон селевого очага превышает критическое значение, при неограниченной его длине, взаимодействие водного потока (расход которого превышает критическое значение) с рыхлообломочными породами приводит к формированию селея, плотность селевой массы которого</p>

этой таблицы, хотя бы для выяснения порядка величин» [4].

Падение дна горного потока, град	Удельный вес селя	
	min	max
15	1,34	1,38
20	1,38	1,46
25	1,42	1,40
30	1,46	1,52
35	1,49	1,53
40	1,49	1,53

Расчетная плотность возможного селевого потока на р. Киши Алматы в створе Медеу по данным Казгидропроекта – 1544 кг/м^3 , объемная концентрация 0,33 [12]. Эти значения использованы при проектировании плотины.

По М.А. Великанову «... мутность ни при каких условиях не может превышать значения 0,5 (считая, повторяем, в относительном объеме и в рыхлом теле ... практически предел лежит несколько ниже, по-видимому около 0,40...0,42)» [4].

ограничивается пределом текучести.

По данным о задержании селя в селехранилище Медеу в 1973 г., плотность селевой массы – 2380 кг/м^3 [7], сея на р. Улкен Алматы 1975 г. – 2500 кг/м^3 (средняя плотность твердых частиц 2650 кг/м^3) [30].

В своих теоретических исследованиях М.А. Великанов не учитывал (в силу отсутствия данных), что скорость падения частиц в условиях стесненности может быть на порядок меньше скорости падения при малой концентрации, не учитывались вязкость и свойство пластичности сред, а также увеличение плотности сред, в которых падали частицы разного размера. Неизвестно было и то, что при полидисперсном составе частиц вязкость суспензии, с ростом их суммарной концентрации, увеличивается на порядки медленнее, нежели при однородном составе. Вследствие этого турбулентное перемешивание сохраняется при объемной концентрации твердого компонента более 0,7 [34].

Помимо турбулентности перемешивание происходит вследствие деформации среды, представленной относительно мелкими частицами и водой, находящейся между относительно крупными частицами, при различной скорости движения последних, а также возникновения поперечных течений, обусловленных продольными и поперечными изгибами русла [4]. Такое перемешивание обеспечивает равномерное распределение частиц твердой фазы в селевой

	<p>массе даже тогда, когда турбулентное перемешивание прекращается из-за больших значений вязкости и пластичности селевой массы.</p>
<p>В соответствии с формулами, описывающими зависимость плотности селевой массы (концентрации твердой фазы в селевой массе) от уклона пути движения селя, плотность турбулентных селей изменяется: с увеличением – увеличивается, с уменьшением – уменьшается [5, 13, 21, 28, 53].</p> <p>Из сказанного следует, что плотность селевой массы, образовавшейся при движении селя на относительно большом уклоне, должна уменьшиться при движении селя на меньшем уклоне.</p> <p>Функции, описывающие зависимость плотности селевой массы от уклона русла монотонные и однозначные.</p>	<p>В результате анализа условий формирования селевой массы при взаимодействии водных потоков с рыхлообломочными породами было установлено, что в ситуациях, имеющих практический интерес (расход селя, скорость его движения, представляют угрозу человеку, объектам хозяйственной деятельности), зависимость между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором селевая масса может перемещаться без остановки и частичного распада, неоднозначна.</p> <p>Было установлено, что при определенных условиях плотная селевая масса, образовавшаяся на относительно большом уклоне, может существовать без остановки и распада на значительно меньших уклонах.</p> <p>Теория существования селевой массы играет ключевую роль при расчете характеристик селей, позволяя определять тенденцию развития селевого процесса: возможность обогащения твердой составляющей или частичный распад селевой массы, а также ее остановку.</p> <p>Теория существования селевой массы позволяет предсказать условия, при которых функция, описывающая зависимость предельной плотности селевой массы (при заданных значениях глубины потока, минералогического и гранулометрического состава</p>

	<p>вов твердой составляющей) от уклона русла претерпевает разрыв. Физический смысл упомянутого разрыва состоит в том, что теоретически бесконечно малое изменение уклона пути движения селя может приводить к конечному изменению плотности селевой массы (не во времени, на конечной длине пути) [33].</p>
<p>Считалось, что конусы выноса горных рек, расположенные на предгорной равнине и содержащие крупные валуны и глыбы с поперечными размерами 8...10 м и более – результат выноса наносов мощными водными потоками, сформировавшимися в периоды таяния гигантских ледников, образовавшихся в ледниковые эпохи плейстоцена. На инженерно-геологических картах такие отложения идентифицируются как результат флювиогляциальной деятельности.</p>	<p>Конусы выноса на предгорной равнине сложены преимущественно отложениями селей [51]. Эти конусы выноса являются банками данных об изменении селевой активности (объемах и повторяемости селей) на протяжении сотен тысяч лет, обусловленной преимущественно изменением регионального климата, вызванного глобальным изменением климата Земли.</p>
<p>Не были известны методы определения генезиса конусов выноса.</p>	<p>Разработан геолого-геоморфологический метод определения генезиса конусов выноса [52].</p> <p>Периферийные горизонталы аллювиального конуса выноса имеют форму, близкую к дуге окружности, а селевого конуса выноса – почти прямой линии или дуги окружности с отрицательной кривизной.</p> <p>Максимальное различие в гранулометрическом составе селевых и аллювиальных конусов выноса имеет место в количественном содержании наиболее мелких и крупных частиц. Аллювиальные отложения практически не содержат пылевато-глинистых</p>

	<p>частиц, а также валунов и глыб, размеры которых превышают 0,5 м.</p>
<p>Сведения о селевой активности в плейстоцене практически отсутствовали. Считалось, что конусы выноса, образованные на выходе рек из гор – результат преимущественно речных отложений. Наличие в отложениях валунов и глыб объяснялось большими расходами горных рек в периоды таяния мощных ледников, формировавшихся в ледниковые эпохи плейстоцена [14].</p>	<p>Установлено, что селевая активность в горных районах средних широт с континентальным климатом и несущим оледенение в условиях климата 20 века определяется глобальным климатом.</p> <p>Селевая активность в ледниковые эпохи плейстоцена практически равна нулю. На конусах выноса, расположенных на выходе рек из гор, и в междуречьях отлагается лёсс. Небольшие сели, образующиеся в среднегорной зоне, в основном отлагаются в горных долинах.</p> <p>Потепление в очередном межледниковье приводит к деградации оледенения, частичному разрушению лёссового покрова, образованию внутриледниковых и поверхностных водоемов. Прорыв водоемов может приводить к формированию катастрофических селей, отлагающихся на конусах выноса, расположенных на предгорной равнине. Однако главная роль в переносе наносов из высокогорья на предгорную равнину принадлежит селям дождевого генезиса.</p> <p>Селевая активность достигает максимума, когда в межледниковые эпохи температура воздуха превышает на 2...3 °С и более. Это объясняется тем, что осадки, выпадающие в настоящее время в летний период в твердом виде, будут выпадать в жидком виде в том числе и на большие площади, освободившиеся от снега и льда.</p> <p>О масштабах увеличения селевой активности можно судить по следую-</p>

	<p>щим примерам. Если «размазать» все сели, вышедшие на конус выноса р. Киши Алматы в голоцене (более 10 тыс. лет), то толщина слоя не превысит 0,5 м. За период максимума селевой активности рисс-вюрмского межледникового, длившегося 100...200 лет, слой отложений близок к 30 м [24].</p>
<p>В настоящее время преимущественно создаются и выпускаются карты селевой опасности, на которых в цвета категорий опасности закрашиваются и территории, не подвергающиеся непосредственно воздействию селей. При этом в легендах таких карт не сообщается о степени селевой опасности на этих территориях.</p>	<p>Все большее распространение приобретают карты селевого риска, хотя при их создании требуется гораздо большее обоснование повторяемости селей различных категорий опасности. Необходима дополнительная информация о характеристиках негативно воздействующих факторов, степени уязвимости объектов потенциального поражения, их стоимости в настоящее время и ближайшие десятилетия, упущенной выгоде, степени воздействия на социально-экономические факторы. Особую сложность представляет оценка изменения селевой активности, вызванного ожидаемым потеплением глобального климата, а также прогноз социально-экономического развития региона, подверженного воздействию селей, на ближайшее столетие. Тем не менее, будущее за картами риска селевой опасности [20, 39].</p> <p>Эти карты будут многофункциональными: помимо информации о селевом риске, они должны содержать информацию о селевой опасности на еще не освоенных территориях. Карты риска должны содержать информацию о времени их создания.</p> <p>Карты селевой опасности не ут-</p>

	<p>ратят в будущем своей актуальности на неосвоенных территориях и должны своевременно обновляться по мере изменения климата и трансформации факторов селеобразования, оставаясь базовым элементом при модернизации ранее разработанных и вновь создаваемых карт селевого риска.</p>
<p>В основе методов прогноза селей дождевого и гляциального генезисов лежали связи метеорологических характеристик с фактическими данными о формировании селей. Как правило, в число предикторов включались: температура воздуха и слой жидких осадков в дни формирования селей, суммы температур за несколько дней, предшествовавших селеобразованию, суммы слоя осадков за несколько дней (месяцев), предшествовавших образованию селей (учет предшествовавшего увлажнения), высота снеговой линии, наличие рыхлообломочных пород [1, 16, 44, 49].</p> <p>Долгосрочные прогнозы селей базировались на выявлении связей селевой активности с циклическими изменениями метеорологических и техногенных факторов [18, 29, 47].</p>	<p>В основе сверхкраткосрочных прогнозов селей лежит в частности информация о характеристиках осадков, получаемая с помощью метеорологических радиолокаторов и данных о выпавших осадках, получаемых метеостанциями и метеопостами, а также автоматическими метеостанциями.</p> <p>При сохранении методов прогноза предшествовавшей парадигмы разрабатываются краткосрочные методы прогноза, базирующиеся на закономерностях формирования селевых потоков в результате взаимодействия водных потоков с рыхлообломочными породами и их математическом описании с помощью моделей, позволяющих определить численные значения принципиально необходимых критических для возникновения селей условий (уклона русла и расхода водного паводка) в зависимости от характеристик потенциальных селевых массивов [15].</p> <p>Сверхдолгосрочные прогнозы разрабатываются на основе данных об изменении температуры воздуха в голоцене и плейстоцене, сценариях изменения климата в 21 веке, геологическом и геоморфологиче-</p>

	ском строении территорий, подвергавшихся воздействию селей в плейстоцене и голоцене [52].
<p>В основе старой парадигмы борьбы с селями лежала в основном защита с помощью гидротехнических сооружений. Предупреждение формирования селей сводилось к охране лесонасаждений.</p>	<p>В современной парадигме (при сохранении методов, подтвердивших свою эффективность) широкое распространение получает превентивное опорожнение поверхностных и подземных водоемов моренно-ледниковых комплексов (путем создания искусственных каналов стока и использования сифонов) [12].</p> <p>Разрабатываются методы активного воздействия на селевую массу с целью изменения ее характеристик [32].</p> <p>Разрабатываются методы, направленные на изменение условий обводнения селеформирующих пород с целью предотвращения напорного режима стока селеформирующих паводков [35]. Стратегия защиты постепенно замещается стратегией управления селевыми процессами [19].</p>

Далеко не все члены селевого научного сообщества воспринимают новую парадигму. Причиной может быть консерватизм, нежелание выйти за рамки полученных знаний или устоявшихся воззрений. Некоторые важнейшие, по нашему мнению, составляющие новой парадигмы были опубликованы 15...30 лет. Однако за все это время ни в научных публикациях, ни на форумах различного формата не затрагивались проблемы дискуссионного характера, и это тревожит. Исключением, пожалуй, является критический анализ зарубежными учеными результатов экспериментальных исследований известного английского ученого Р.А. Багнольда, развивавшего в одно и то же время с М.А. Великановым энергетический подход к определению транспортирующей способности потоков.

Сложившаяся обстановка с состоянием новой парадигмы губительно сказывается на разработке нормативных документов, регламентирующих про-

ектирование, строительство и эксплуатацию селезащитных сооружений, проведение превентивных мероприятий по снижению ущерба, наносимого селями.

Опыт проектирования и эксплуатации селепредотвращающих, стабилизирующих, селезадерживающих, селенаправляющих и селепропускных сооружений в Казахстане свидетельствует о том, что действующие нормативные документы морально устарели, их содержание не учитывает специфики селевых явлений, в них отсутствуют разделы, посвященные предотвращению селей, вызванных человеческим фактором. Это приводит к человеческим жертвам и материальному ущербу, а также создает предпосылки для потенциальных катастроф.

На необходимость создания нормативных документов (СНиП), базирующихся на последних достижениях науки и мировом опыте эксплуатации селезащитных сооружений, на протяжении десятилетий обращали внимание ведущие специалисты СССР в области селей. В 1979 г. заместитель министра мелиорации и водного хозяйства СССР Б.Г. Штепа писал: «Нельзя признать удовлетворительным и положение с разработкой и изданием необходимых нормативных документов» [48]. В 1981 г. профессор МГУ, председатель селевой комиссии АН СССР д.т.н. С.М. Флейшман, к.г.-м.н. Б.Н. Иванов, заместитель начальника Казселезащиты А.Ю. Хегай акцентировали внимание на том, что «создание нормативных документов для противоселевого проектирования следует считать задачей номер один ...» [41]. Спустя 7 лет, в 1988 г. А.Ю. Хегай и Н.В. Попов вновь возвращаются к этой проблеме: «До сих пор у нас нет нормативных документов по расчетам параметров возможных селей, ущерба от стихийных явлений и эффективности защитных работ» [45]. В 1990 г. ведущий специалист Казселезащиты, к.г.н. Н.В. Попов писал: «Существенным образом затрудняет разработку рекомендаций защитных мер и проектирование инженерных сооружений отсутствие необходимой расчетной базы и нормативных документов ...» [27].

В настоящее время мероприятия по защите от селей в Казахстане регламентируются нормами и правилами, представляющими собой усеченные варианты СНиП, разработанных в СССР в 80-е годы, в которых не учтен опыт проектирования, строительства и эксплуатации селезащитных сооружений последних десятилетий, а также проблемы, обусловленные изменением климата.

В 2001 г. на это указывалось и в письме главного инженера ЗАО «Казгидропроект» И.Я. Вильковиского директору КазНИИМОСК М.Ж. Бурлибаеву: «ЗАО «Казгидропроект» полностью разделяет Вашу точку зрения о необходимости переработки устаревших документов СН 518-79, ВСН 03-76, П-814-84 с учетом проведенных Вашим и другими институтами исследований в 1985...2000 гг., во многом изменивших ранее существовав-

шие представления о механизмах селеобразования, возможных масштабах селевых явлений и методах селезащиты, а также практике проектирования, строительства и эксплуатации селезащитных сооружений в Казахстане и других селеопасных районах. В упомянутых выше нормативных документах из-за недостаточной изученности селей не нашли отражение многие важнейшие вопросы проектирования или по ним даны неверные рекомендации. Коренная переработка нормативных документов обусловлена необходимостью как проектирования противоселевых объектов, так и проверки достаточности и надежности противоселевых мероприятий на территории РК». В цитируемом письме приводится и перечень дополнительных вопросов, которые должны найти отражение в новых нормативных документах.

Крупнейшим недостатком действующих нормативных документов является отсутствие требований о необходимости разработки проектной документации, регламентирующей мероприятия, проводимые после заполнения селехранилищ. Заполненное селехранилище становится потенциальным очагом селеформирования, расположенным, как правило, в непосредственной близости от защищаемых объектов. При этом вероятность гибели людей многократно возрастает из-за малой заблаговременности предупреждения о селевой опасности.

Создание современных СНиП позволит не только усовершенствовать существующие селезащитные сооружения, но и разработать, и внедрить новую стратегию защиты от селей, в основе которой должны лежать превентивные мероприятия по снижению и даже устранению селевой опасности. Новая стратегия защиты от селей будет не только значительно экономичнее реализуемой в настоящее время, но и позволит предотвратить развитие эрозионных процессов, приводящих к опустыниванию и снижению биоразнообразия.

Авторы изложенной выше новой парадигмы не претендуют на ее завершенность и «истину в последней инстанции», и призывают тех, для кого познание природы селей и борьба с их негативными последствиями небезразличны, принять активное участие в обсуждении содержания современной селевой парадигмы, включая защиту от селей и управление селевыми процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В., Кумукова О.А., Сейнова И.Б., Богаченко Е.М. Метод фонового прогнозирования селевой опасности на Центральном Кавказе и результаты его апробирования / Тр. Межд. конф. «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». – 22–29 сентября 2008 г., Пятигорск, Россия. – С. 263-266.
2. Боголюбова И.В. Селевые потоки и их распространение на территории СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 152 с.

3. Вардугин В.Н., Малахов В.Д. Эффективные методы защиты селевых бассейнов Казахстана. – Алма-Ата: КазИНТИ, 1988. – 66 с.
4. Великанов М.А. Гидрология суши. – Л.: Гидрометиздат, 1948. – 530 с.
5. Великанов М.А. Работа взвешивания наносов // Селевые потоки и меры борьбы с ними. – М.: Издательство АН СССР, 1957. – С. 55-64.
6. Виноградов Ю.Б. Эрозионно-сдвиговой селевой процесс // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – №1. – С. 114-121.
7. Виноградов Ю.Б., Земс А.Э., Хонин Р.В. Селевой поток 15 июля 1973 г. на Малой Алматинке // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – №1. – С. 60-73.
8. Гавришина Л.Н. Методика определения статического напряжения сдвига вязкопластичных селевых смесей // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – №9. – С. 105-113.
9. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. – 386 с.
10. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 528 с.
11. Голубович В.А. О волнообразном характере движения селевых потоков // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1980. – №4. – С. 27-30.
12. Дуйсенов Е. Селевые потоки в Заилийском Алатау. – Алма-Ата: Казахстан, 1971. – 192 с.
13. Замарин Е.А., Попов К.В., Фандеев В.В. Гидротехнические сооружения. – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1952. – 543 с.
14. Илийская долина, ее природа и ресурсы / Под ред. М.И. Ломоновича. – Алма-Ата: Издательство АН КазССР, 1963. – 341 с.
15. Киренская Т.Л. Методические основы прогнозирования селевых потоков ливневого происхождения (на примере Заилийского Алатау): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Ташкент, 1988. – 20 с.
16. Киренская Т.Л. О прогнозировании ливневых селей в Заилийском Алатау // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – №9. – С. 77-84.
17. Кун Т.С. Структура научных революций. – М.: Прогресс, 1977. – 300 с.
18. Мальнева И.В., Кононова Н.К. Активность селей на Северном Кавказе в период современных изменений климата и ее прогноз до 2015 г. / Труды Всероссийской конференции по селям: 26-28 октября 2005 г. / Под ред. М.Ч. Залиханова. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – С. 98-105.
19. Медеу А.Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы управления. – Алматы, 2011. – Т. 1. – 284 с.

20. Медеу А.Р., Тасболат Б., Дайрабаева А.Ж. Методологические основы количественной оценки селевых рисков // Материалы I Международной научно-практической конференции «Дни науки», 21–29 декабря 2005 г. – Днепропетровск, 2006. – С. 241–243.
21. Мостков М.А. Гидравлические закономерности в горных потоках // Селевые потоки и меры борьбы с ними. – М.: Издательство АН СССР, 1957. – С. 18-54.
22. Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Волны в селях. – М.: Издательство научтехлитиздат, 2011. – 160 с.
23. Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Одномерные наносонесущие русловые потоки. – М.: Издательство научтехлитиздат, 2012. – 192 с.
24. Оценка воздействий изменения климата и мер адаптации для прибрежной зоны Каспийского моря и горных районов Южного и Юго-Восточного Казахстана: Резюме для лиц, определяющих социально-экономическую и природоохранную политику – Алматы: КазНИИ-МОСК, 2000. – 49 с.
25. Перов В.Ф. Селевые явления на территории СССР. Итоги науки и техники. Серия Гидрология суши. – Т.7. – М.: ВИНТИ, 1989. – 149 с.
26. Перов В.Ф. Селевые явления. Терминологический словарь. – М.: Изд-во МГУ, 2014. – 72 с.
27. Попов Н.В. Опыт разработки и реализации комплексных и специальных схем инженерной защиты территорий от опасных геологических процессов в Казахстане // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата, 1990. – С. 18–24.
28. Саноян В.Г. Транспортирующая способность потока в общем случае движения // В кн.: Эрозионные селевые процессы и борьба с ними. – 1980. – Вып.7. – С. 104–118.
29. Сидорова Т.Л. Оценка селевой деятельности по климатическим параметрам: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – М., 1997. – 20 с.
30. Степанов Б.С. К определению плотности селевых потоков // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1977. – №2. – С. 79-83.
31. Степанов Б.С. О механизме эрозионно-сдвигового процесса // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1978. – №3. – С. 130–133.
32. Степанов Б.С. Основные закономерности формирования, движения и остановки селей: Автореф. дис. ... доктора геогр. наук. – Алматы, 2000. – 48 с.
33. Степанов Б.С. Явление скачкообразного изменения плотности селевых потоков. Заявка на открытие // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – №12. – С. 141-172.

34. Степанов Б.С., Степанова Т.С. Механика селей. – М.: Гидрометеиздат, 1991. – 380 с.
35. Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. Механизмы, приводящие к формированию селей дождевого генезиса в высокогорной зоне Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – 2001. – №1-2. – С. 74-81.
36. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. К истории познания природы водоледяных селей // Гидрометеорология и экология. – 2011. – №3. – С. 102-111.
37. Степанова Т.С. О принципе пульсации в селевом процессе // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1980. – №4. – С. 24-26.
38. Степанова Т.С. Цепной селевой процесс и образование очагов // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1989. – №11. – С. 43-48.
39. Тасболат Б. Теоретические основы оценки селевого риска // Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия Географ. – 2004. – №2(19). – С. 129-134.
40. Тевзадзе В.И. Результаты экспериментальных исследований по определению основных реологических характеристик связанных селевых потоков // Селевые потоки. – 1983. – №7. – С. 75-83.
41. Флейшман С.М., Иванов В.Н., Хегай А.Ю. Насущные задачи селевой науки и практики // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1981. – С. 3-18.
42. Флейшман С.М. Селевые потоки. – М.: Географгиз, 1951. – 96 с.
43. Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 312 с.
44. Фоновый прогноз гляциальных селей / Хоменюк Ю.В., Плеханов П.А., Токмагамбетов Г.А., Максимов А.Б. – Алма-Ата: Наука, 1985. – 63 с.
45. Хегай А.Ю., Попов Н.В. Перспективы и проблемы инженерной защиты от селей в Казахстане // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1988.
46. Хонин Р.В. К вопросу о классификации селевых очагов // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1980. – №4. – С. 51-56.
47. Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. – М.: Недра, 1980. – 296 с.
48. Штепа Б.Г. Основные проблемы защиты территории СССР от селевых потоков // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1979. – С. 7-22.
49. Яфязова Р.К. К концепции сверхкраткосрочного прогноза // Гидрометеорология и экология. – 2014. – №4. – С. 52-57.
50. Яфязова Р.К. О катастрофических явлениях на горных реках в зимний период // Гидрометеорология и экология. – 2005. – №4. – С. 114-124.

51. Яфязова Р.К. Основные закономерности формирования селевых конусов выноса (на примере северного склона Заилийского Алатау): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Алматы, 1998. – 21 с.
52. Яфязова Р.К. Оценка селевой активности и прогнозирование ее изменения в условиях глобального потепления климата: Автореф. дис. ... доктора техн. наук. – Алматы, 2009. – 36 с.
53. Bagnold, R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. Geological Survey Professional Paper 422-1.

Поступила 8.10.2014

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

СЕЛЗЕРТТЕУДІҢ ДАМУ КЕЗЕҢІ - ПАРАДИГМАНЫҢ ҚОЗҒАЛУЫ

Мақалада 20 ғасырдың 70-ші жылдарына дейін авторлардың пікірінше бар парадигманың қозғалу қажеттілігін тудыратын негізгі жағдайлары келтірілген.