

УДК 556.535.6

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НАНОСОВ ГОРНЫМИ РЕКАМИ В ПОСТСЕЛЕВЫЕ ПЕРИОДЫ

Э.А. Турсунов

Оценена скорость перемещения крупных песчано-гравелистых массивов, образующихся в русле реки после прохождения селя.

Эксперименты КазНИГМИ и Казселезащиты по воспроизведению искусственных селей проводились в 1972, 1973, 1975, 1976, 1978, 1988, 1991 и 2003 годах. Целью экспериментов являлось выявление механизмов формирования селей при взаимодействии сосредоточенных водных потоков с рыхлообломочными породами, последующей их трансформации по мере движения до выхода из гор, что позволило разработать модели, описывающие изменение основных характеристик селей при их движении на относительно больших уклонах ($9 \dots 11^\circ$ и более) [8]. Был решен ряд задач по практическому применению и испытанию различных приборов и устройств, оповещающих о селевой опасности.

Эксперименты заключались в подаче воды в селевой врез из водохранилища, далее развитие селевых процессов практически не отличались от естественных. С таким же успехом они могли возникнуть в результате прорыва моренных озер или выпадения мощных ливней на альпийских лугах в пределах водосбора селевого очага [10].

Одним из результатов проведенных экспериментов стала возможность натурального наблюдения постселевых явлений в русле р. Чемолган. Уже на следующий день после прохождения селевых потоков в русле можно было наблюдать движущиеся песчано-гравелистые массивы. При этом скорость движения массивов составляла $2,2 \dots 2,6$ км/сут. В длину они достигали более 3 км [6]. Такая скорость движения песчано-гравелистых массивов значительно выше скорости движения влекомых наносов, наблюдаемых на пологих участках русел. Изучение постселевых процессов в русле р. Чемолган позволило выявить причину такого несоответствия. Так, на участках русла р. Чемолган, где после селя перемещение песка проявляется в максимальной мере, русло полностью перекрывается слоем песка толщиной от 20 до 50 см и, вследствие этого, полностью сглаживается его есте-

ственная шероховатость. Течение реки на этих участках становится близким по характеру таковому на равнинных участках. В результате на этих участках периодически формируются гряды, которые, через какое-то непродолжительное время, разрушаются и частицы, слагающие эти гряды, переходят во взвешенное состояние. Находясь во взвешенном состоянии, эти частицы перемещаются вниз по руслу до момента их осаждения на дно со скоростями, близкими к скорости течения реки на этом участке. В результате общий расход наносов, перемещающихся рекой, сильно возрастает [7].

Для определения скорости перемещения песчано-гравелистых массивов в руслах рек необходимо знать не только механизмы формирования и разрушения гряд, но и время, затрачиваемое потоком от начала формирования гряд, до момента их разрушения и взвешивания частиц, составляющих их объем, а также время, которое эти частицы находятся во взвешенном состоянии. Тогда по скорости перемещения частиц, составляющих объем гряды, можно судить о скорости перемещения всего песчано-гравелистого массива.

Как известно из курса речной гидравлики, в горной реке, продольный уклон русла которой превышает критическое значение, в случае возникновения препятствия на пути потока равного, или превышающего $0,2 h$; (где h - глубина потока), наблюдается возникновение гидравлического прыжка [4]. При этом происходит изменение свободной поверхности потока. Как следствие, на расположенный за данным препятствием грунт поток воздействует уже не параллельно, а под определенным углом. Для р. Чемолган, у которой глубина потока при бытовом режиме находится в пределах 10...15 см, достаточно появления на поверхности дна частиц с размерами в 2...3 см. Такие частицы по результатам исследований гранулометрического состава песчано-гравелистых массивов р. Чемолган составляют до 5% от общего объема [6].

Появление крупных частиц гравия на поверхности песчано-гравелистого массива обуславливается переформированием его грансостава под воздействием водного потока, в результате чего более мелкие частицы песка выносятся вниз по течению, а крупные остаются в относительной неподвижности. Так происходит до тех пор, пока крупные частицы на поверхности массива не достигнут количества, при котором они начинают влиять на свободную поверхность потока воды над массивом.

Воздействие потока на донные отложения под углом приводит к их интенсивному выносу, в результате чего образуется воронка размыва. При этом происходит взвешивание частиц, которые при параллельном воздей-

ствии потока оставались бы неподвижными. Обладая большими значениями гидравлической крупности, эти частицы совершают кратковременные скачки и вновь осаждаются. Для р. Чемолган путь, проходимый частицами с размерами от 2 до 5 мм, составляет от 1,5 до 2,0 м. Как раз такое расстояние и наблюдалось между грядами. Следовательно, можно говорить о том, что возникновение гидравлического прыжка является первопричиной начала формирования гряды. Формирующаяся гряда, в свою очередь, является препятствием и способствует изменению свободной поверхности потока. Таким образом, процесс переноса наносов в русле горной реки становится грядовым. При углублении дна воронки размыва между грядами увеличивается угол наклона струи и, как следствие, увеличивается интенсивность размыва. Теоретически так может происходить до тех пор, пока склон гряды, по которому стекает поток воды, не приобретет очертания водослива практического профиля. При подходе к нижележащей гряде поток воды обтекает ее, при этом верхний склон подвергается интенсивному размыву. Так как поток при обтекании гряды становится направленным вверх, то вертикальная составляющая скорости потока возрастает. Частицы с большими линейными размерами, в случае превышения значения вертикальной составляющей скорости потока значений гидравлической крупности этих частиц, взвешиваются и, в зависимости от размера, либо перемещаются на гребень гряды, способствуя росту последней, либо перелетают ее и уносятся потоком. Углубление воронки размыва приводит к увеличению угла наклона движения потока вверх. В результате увеличивается и вертикальная составляющая скорости потока, что приводит к взвешиванию еще большего количества крупных частиц и увеличению интенсивности размыва верхнего откоса гряды.

По мере увеличения высоты гряды происходит увеличение площади соприкосновения дна и потока воды, в результате чего слой крупных частиц уменьшается до тех пор, пока не происходит «вторжение» струи в слой отложений, в котором содержание крупных частиц незначительно. Скорость размыва резко возрастает, размеры гряд быстро увеличиваются. Всё это происходит до тех пор, пока струя не выйдет на уровень шероховатости русла в её естественном состоянии. Деформация переднего склона гряды приводит к опрокидыванию волны, что приводит к резкому увеличению перемешивания и взвешиванию большей части наносов и их переносу на нижерасположенные участки. После выхода нисходящей струи на уровень бытовой шероховатости русла начинается разрушение наиболее низко расположенной по тече-

нию гряды. К моменту разрушения нижней гряды начинается процесс разрушения следующей гряды и т.д. В результате все гряды на участке разрушаются, наносы перемещаются в основном во взвешенном состоянии вниз по течению, где аккумулируются, после чего процесс повторяется [9].

Скорость перемещения массива песка в горной реке существенно отличается от скорости, присущей грядовому перемещению наносов на равнинных реках. Если при грядовом перемещении наносов в руслах равнинных рек скорость определяется несколькими сантиметрами в сутки, то на горном участке р. Чемолган скорость движения песчано-гравелистого массива составила несколько километров в сутки. С другой стороны, скорость движения массива песка значительно меньше скорости течения реки. Ответ на вопрос о причинах вышеупомянутого, кроется в описанном выше механизме формирования и разрушения гряд.

Для оценки скорости перемещения гряды необходимо знать время от начала формирования гряды до момента ее разрушения, или взвешивания частиц, составляющих объем гряды, и время осаждения этих частиц. Вполне очевидно, что время формирования и разрушения гряды будет соответствовать времени, затраченному потоком на образование воронки размыва в пространстве между двумя грядами до того момента, пока гряда не разрушится. Будем считать это временем взвешивания частиц, составляющих объем гряды, и обозначим ее как T . Время осаждения частиц, составляющих объем гряды, напрямую зависит от значений их гидравлической крупности, обозначим ее как t .

В основу расчета глубины размыва положим гипотезу И.И. Леви [5] о том, что размыв происходит до тех пор, пока скорость течения на выходе из воронки не снизится до неразмывающих значений. При этом считается, что в воронке размыва тратится вся избыточная кинетическая энергия потока, возникающая из-за разности отметок гребня гряды и подвалья.

Неразмывающую скорость потока определим по зависимости В.Н. Гончарова [3],

$$V_n = l g \frac{8,8H}{d_5} \sqrt{\frac{2g(\gamma_1 - \gamma)d}{3,5\gamma}}, \quad (1)$$

где d и d_5 средний и 5 % диаметр частиц гранулометрического состава соответственно; γ_1 и γ удельный вес наносов и воды соответственно.

Изменение максимальной скорости потока по длине воронки размыва находим из зависимости Т.Х. Ахмедова [2]

$$V_m = 1,8 \sqrt{\frac{a}{x-2,2}}, \quad (2)$$

где a – величина, зависящая от начальных условий. В условиях стекания струи потока воды в ограниченном пространстве с шероховатыми стенками $a = 10$; x – длина пути. При достижении максимальной скоростью потока (в воронке размыва) значений неразмывающей скорости, длина пути будет показывать максимально возможную длину, на которой будет происходить размыв, т.е. длину воронки размыва.

На выходе из воронки размыва течение становится характерным для открытых русел. Средняя скорость такого течения определяется по зависимости $V_{cp} = 0,7 \cdot V_m$, следовательно

$$V_{cp} = 0,7 \cdot 1,8 \sqrt{\frac{a}{x-2,2}}. \quad (3)$$

Решая это выражение относительно x и считая, что размыв прекратится при $V_{cp} = V_n$ получим длину воронки размыва [2]:

$$x = b_0 \left[\frac{a}{\left(\frac{V_n}{0,7V_0} \right)^{1,8}} + 2,2 \right], \quad (4)$$

где b_0 – начальная толщина струи потока, в нашем случае равная глубине потока H_0 .

Зная теперь длину траектории размыва, можно вычислить глубину размыва за грядой [2].

$$H_t = \frac{x + b_0 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\sin \varphi} - 1 \right) \right] + \frac{h}{2 \sin \varphi}}{\left(1 - \frac{c}{2} \right) \left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\sin \varphi} \right) + c}, \quad (5)$$

где c – константа турбулентности. В рассматриваемом случае $c = 0,3$ (по Г.Н. Абрамовичу), α и φ – углы падения струи потока и откоса воронки размыва соответственно. В нашем случае эти углы равны, так как поток воды обтекает как склоны гряды, так и откосы образовавшейся воронки размыва. В этом случае при учете, что $b_0 = H_0$, глубина размыва между грядами будет равна:

$$H_t = \frac{x + H_0 \left[\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right] + \frac{h}{2 \sin \alpha}}{\frac{2}{\sin \alpha} \left(1 - \frac{c}{2} \right) + c}. \quad (6)$$

Произведенные по формулам (1), (4) и (6) расчеты показали, что при наличии в русле р. Чемолган массива песка со средним диаметром 2 мм, воронка размыва, образующаяся за грядой, может достигать 38 см в глубину и иметь длину до 11 м.

Таким образом, подтверждается, что размыв грунта, имеющий место после возникновения гидравлического прыжка, приводит вначале к образованию гряд, а при дальнейшем размыве, к их разрушению.

Для нахождения времени взвешивания частиц, составляющих объем гряды, воспользуемся расчетом динамики размыва, разработанной С.Х. Абалянцем [1] для искусственных русел.

Основой для расчетов служит формула расхода воды:

$$Q = U \chi R, \quad (7)$$

где U – скорость течения, определяемая по формуле Шези; R – гидравлический радиус; χ – смоченный периметр.

Для р. Чемолган с шириной русла около 6 м и глубиной потока, не превышающей 15 см, можно принимать $R = H_0$. Тогда скорость течения воды, определяемой по формуле Шези, можно записать как

$$U = C \sqrt{HI}, \quad (8)$$

где I – уклон. Для р. Чемолган уклоны определялись по карте масштаба 1:50000.

Предельно неразмывающая скорость потока определяется по формуле:

$$U_0 = AH^{1/4}, \quad (9)$$

Для песка с крупностью $d_0 = 0,2$ мм и менее: $A = 0,39$; для песка более крупных фракций:

$$A = 0,39 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{1/4}. \quad (10)$$

Расход влекомых наносов определим по эмпирической формуле И.И. Леви, которую С.Х. Абалянц подкорректировал на основании натуральных данных, введя численный коэффициент [1]:

$$R = \frac{0,030U^3(U - U_0)}{(Hd)^{1/4}}. \quad (11)$$

Объем гряды представим как произведение её длины, равной 1,5 м, на её высоту при максимальном развитии, равной 30 см, при коэффициенте формы гряды, равном 0,6.

Массу песка, из которого сложена гряда, определим, приняв среднюю плотность грунта 1600 кг/м³

$$G = Wp, \quad (12)$$

где W – объем гряды; p – плотность грунта.

Теперь, для того, чтобы определить время взвешивания песка, составляющего объем гряды, достаточно разделить массу грунта, составляющего объем гряды, на расход донных наносов.

$$T = \frac{G}{q}, \quad (13)$$

где q – расход влекомых наносов.

Время осаждения частиц, составляющих объем гряды, рассчитаем из предположения, что взвешиваемая, под действием вертикальной составляющей пульсации скорости, частица достигает поверхности потока, а потом осаждается со скоростью, равной её гидравлической крупности.

$$t = \frac{H}{w}, \quad (14)$$

где w – гидравлическая крупность.

Так как нам известна скорость потока и время, которое частицы песка находятся в толще потока, начиная с момента их взвешивания и кончая моментом их осаждения на дно русла, то можно определить расстояние, на которое перенесли эти частицы, находясь во взвешенном состоянии.

$$l = Ut, \quad (15)$$

Соответственно, скорость перемещения объема частиц, составляющего гряду V :

$$V = \frac{l}{T + t}, \quad (16)$$

Время, необходимое для перемещения песка, составляющего гряду по длине участка, можно определить путем деления длины участка L на скорость перемещения объема частиц, составляющих гряду V .

$$T_m = \frac{L}{V}, \quad (17)$$

Таблица

Расчет скорости движения постселевого массива р. Чемолган

L , м	I	U , м/с	R , кг/с	T , с	l , м	V , м	T_m , с
960	0,083	3,02	16,36	26,41	2,46	0,09	10 603,6
900	0,089	3,12	18,71	23,09	2,55	0,11	8 163,4
580	0,034	1,95	2,54	169,85	1,59	0,01	62 133,2
1060	0,075	2,88	13,30	32,47	2,35	0,07	14 673,8
820	0,049	2,31	5,32	81,21	1,89	0,02	35 310,8
780	0,077	2,91	13,84	31,21	2,37	0,08	10 278,5
1400	0,057	2,50	7,43	58,17	2,04	0,04	39 898,6
700	0,057	2,50	7,43	58,17	2,04	0,04	19 949,3
1240	0,048	2,30	5,23	82,61	1,88	0,02	54 539,3
600	0,067	2,71	10,26	42,09	2,20	0,05	11 454,8
2600	0,046	2,25	4,73	91,30	1,83	0,02	129405,8
800	0,050	2,34	5,60	77,08	1,91	0,02	32 296,8
1060	0,075	2,88	13,30	32,47	2,35	0,07	14 673,8
1150	0,052	2,39	6,13	70,45	1,95	0,03	41 544,0
650	0,031	1,84	1,99	216,93	1,50	0,01	94 147,3
1180	0,068	2,73	10,63	40,63	2,22	0,05	21 566,6
500	0,040	2,10	3,49	123,72	1,71	0,01	36 223,9
600	0,033	1,91	2,37	182,65	1,56	0,01	70 301,9
620	0,032	1,88	2,20	195,97	1,53	0,01	79 231,1
360	0,056	2,47	7,00	61,72	2,01	0,03	11 040,7
450	0,044	2,21	4,37	98,90	1,80	0,02	24 724,5
480	0,042	2,14	3,81	113,42	1,74	0,02	31 238,1
320	0,063	2,62	8,97	48,19	2,13	0,04	7 223,6
350	0,057	2,50	7,43	58,17	2,04	0,04	9 974,6
430	0,047	2,26	4,81	89,82	1,84	0,02	20 973,4

Скорость перемещения всего массива можно, в первом приближении, оценивать по зависимости (17). При этом следует отметить, что при более точных подсчетах необходимо учитывать время, необходимое на переформирование гранулометрического состава наносов на верхней границе донных отложений. Не учет этого времени, судя по всему, должен давать незначительное завышение скорости перемещения песчано-гравелистого массива.

Расчет движения песчано-гравелистого массива в русле р. Чемолган, выполненный по описанным выше зависимостям, представлен в виде табл. 1. В первой графе L – длины участков русла р. Чемолган с характерными уклонами, снятыми непосредственно с карты масштаба 1:50000. Во второй графе I – значения уклонов русла на этих участках. В третьей графе U – значения скоростей течения реки на этих участках, определенных согласно формуле (8). Значение $U_0 = 0,55$ м/с – определено по формуле (9). В четвертой графе R – подсчитанный по формуле (11) расход наносов, выносимых из междугрядья. Пятая графа определяет время T – необходимое потоку на взвешивание объема песка, составляющего гряды. Время осаждения частиц t определено по формуле (14) и равно 0,82 с. В шестой графе l – расстояние, пройденное частицами с момента взвешивания до момента осаждения, определенное по формуле (15). В седьмой графе V – скорость, с которой передвигается объем гряды, определенный по формуле (16). В восьмой графе T_m – время, за которое объем гряды проходит соответствующий участок, определенное по формуле (17).

Согласно расчетам, приведенным в таблице, общая длина русла от места образования селевого массива до выхода реки на равнинную территорию составляет 20590 м, а время движения массива составляет 891572 с или почти 10,5 сут. Средняя скорость движения песчано-гравелистого массива оценивается в 2,3 см/с или около 2 км/сут. Данные величины хорошо согласуются с наблюдениями за движением песчано-гравелистого массива, произведенными в периоды проведения экспериментов по искусственному воспроизведению селей на Чемолганском полигоне с 1972 по 1978 годы, в 1988 году, 1991 и 2003 годах.

Автор приносит благодарность Б.С. Степанову за оказанную помощь и конструктивные предложения, высказанные им в процессе подготовки настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абалянц С.Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - 240 с.
2. Ахмедов Т.Х. Разрыв скального русла. Алма-Ата.: Изд-во Наука Казахской ССР, 1982. - 108 с.
3. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. - Л.: Гидрометеиздат, 1962. - 374 с.
4. Караушев А.В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.

5. Леви И. И. Динамика русловых потоков. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 252 с.
6. Светлаков Е.И. Постселевые явления в русле р. Чемолган 12-22 сентября 1991 г. // Селевые потоки – 1992.- №. 12. – С. 110-112.
7. Степанов Б.С. Об особенностях переноса песчаных массивов водными потоками в постселевой период // Селевые потоки – 1992 .- №. 12. – С. 113 – 116.
8. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Сели. Гипотезы, решающие эксперименты, теория и практика, прогноз. // Гидрометеорология и экология. – 2002. - № 3. – С. 85 –97.
9. Турсунов Э.А. Перенос наносов на горных реках в постселевые периоды. // Гидрометеорология и экология. – 2002. - № 4. – С.125 – 130.
10. Хонин Р.В., Мочалов В.П., Земс А.Э. Экспериментальный полигон в бассейне р. Чемолган и история его создания. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1976. - № 1 – С. 7 – 25

Казахский научно-исследовательский институт
мониторинга окружающей среды и климата

СЕЛДЕН СЕЙІНГІ КЕЗЕҰДЕРДЕГІ СОСЫСТАРДЫҰ ТАУЛЫ
ҰЗЕНДЕРМЕН ЖЫЛЖУ ЖЫЛДАМДЫҰЫН БАҚАЛАУ

Э.А. Тұрсұнов

*Сел ұткеннен соҰ Ұзен жырасында пайда болатын ірі ілм-
тасты массивтерді Ұ жылжу жылдамдыҰы бақаланған.*