

6. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противозерозионных мероприятий на Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 62 с.
7. Боголюбова И.В., Караушев А.В. Водная эрозия и сток наносов // Труды ГГИ, 1974. Вып. 210. С. 5–21.
8. Ржаницын Н.А. Ручейковая сеть и склоновые процессы // Результаты исследований речных русел и гидрологических сооружений. М.: Ун-т Дружбы народов, 1983. С. 106–129.

Московский государственный университет  
Географический факультет

Поступила в редакцию  
25.06.99

## HYDROLOGICAL-MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF GULLY-BALKA SYSTEMS IN THE CENTRAL PART OF THE RUSSIAN PLAIN

V.P. BONDAREV, E.V. ZORINA, S.N. KOVALEV

### Summary

The interrelations of gully-balka systems' morphometry and hydrological characteristics are analyzed. Runoff transformations were calculated, using morphometric parameters of drainage basins and observations at one of the typical gully-balka watersheds in the central part of the Russian Plain. The relation between mean-maximal runoff and stream's order of the upper links of the drainage network has been obtained:  $Q_n = Q_1 N^n$ , where  $Q_n$  – runoff of the  $N$ th order stream,  $Q_1$  – runoff of the 1st order stream,  $n$  – empirical coefficient. "n" equals to 2,7 for mean-maximal runoffs; it differs in regions with different natural conditions and depends mainly on morphometry of basins of low orders. It changes also with time.

УДК 551.435.76+551.311.33(470.43)

© 2000 г. Н.И. КЛЮЧАРЕВ

## ОБРАЗОВАНИЕ ЛЁССОВОЙ ПЫЛИ ПРИ ДЕФЛЯЦИИ НА СКЛОНЕ

Крупная пыль (0,05–0,01 мм) – преобладающая фракция в лёссах, и она определяет основные их свойства. Поэтому выявление условий образования и отложения этих частиц в значительной степени помогает ответить на вопрос происхождения лёссов. Противники эоловой теории происхождения отмечают несоответствие между количеством крупной пыли в лёссах и содержанием этой фракции в возможных источниках развевания [1]. Это несоответствие выявлено также и для лёссов жигулевского левобережья р. Волги, в частности Тольяттинского промузла, где очагами развевания были уступы надпойменных террас.

При изучении эоловых процессов, вызванных переформированием волнами Куйбышевского водохранилища склона высокой среднечетвертичной террасы Волги у г. Тольятти и действием нормальных к ее уступу южных зимних ветров, вначале было визуально отмечено повышенное содержание пыли в эоловом осадке, накапливаемом на поверхности террасы. Затем это подтвердилось при попытке составить баланс между развеваемыми отложениями и эоловыми осадками. И первой реакцией на это было стремление критически пересмотреть имеющиеся данные гранулометрического анализа проб из развеваемого склона и провести контрольные определения по основному естественному источнику пылеватых и глинистых частиц – пачке перигляциальных [2] разнозернистых песчаных отложений ( $pglQ_2$ ) видимой мощностью 35–40 м, составляющих основную часть склона. Покрывающие эту пачку древнеэоловые мелкозернистые пески ( $eolQ_4$ ,  $eolQ_3$ ) мощностью 10–20 м пылевато-глинистых частиц не содержат; Москвитиним [3] было признано, что эти пески наветренные, вынесенные из долины, это и подтвердилось последующими изысканиями [4].

Усредненный гранулометрический состав песков, слагающих склон террасы

Генезис	Стратиграфический индекс	Фракции, мм						Количество определений	Мощность, м	
		1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005			< 0,005
		гранулометрический состав, %								
Древнеэоловые	<i>eolQ<sub>4</sub></i> , <i>eolQ<sub>3</sub></i>	0,9	31,6	63,0	4,5			12	15	
Перигляциальные	<i>pglQ<sub>2</sub></i>	1,4	24,9	46,5	20,9	2,4	1,9	2,0	27	35
Коллювиальные (осыпь)	<i>cQ<sub>4</sub></i>	1,0	35,0	44,6	18,6	0,2	0,6		6	10

Расположенные в нижней части склона осыпи мощностью до 7–10 м содержат гораздо меньше пылевато-глинистых частиц, чем перигляциальные пески, так как являются результатом смешения при осыпании древнеэоловых и перигляциальных песков (табл. 1).

Проведенные контрольные исследования не изменили прежних результатов определения гранулометрического состава перигляциальных песков и, в том числе, содержания в них пылеватых частиц. Доля фракции крупной пыли (в среднем из 27 определений) оказалась равной 2,4%, но в отдельных пробах из весьма редких тонких супесчаных и глинистых прослоев содержание этой фракции составляет 9–11%. Преобладающая масса песков относится к слабопылеватым, реже – к слабоглинистым.

После уточнения гранулометрического состава песков и, в частности, количества в развесаемой толще крупной пыли и сопоставления его с количеством ее в эоловых осадках возникло предположение, что причиной отмеченного несоответствия может быть выветривание. Сведения о возможности этого явления и, в частности, дробления зерен кварцевого песка преимущественно на частицы 0,05–0,01 мм известны в литературе и получены на основании лабораторных испытаний [1, 5, 6].

Чтобы выяснить, как это применимо к рассматриваемым природным условиям, необходимо показать величину и степень несоответствия гранулометрического состава эолового осадка и развесаемых отложений. Для этого, прежде всего, укажем на особенности современных эоловых процессов на волжском склоне. Во-первых, отметим, что геоморфологические условия участка благоприятствуют эоловым процессам. По направлению наиболее сильных зимних ветров от уреза Куйбышевского водохранилища выделяются: 1) бечевник шириной до 60 м и высотой до 1 м, 2) склон среднечетвертичной террасы высотой 60 м и крутизной 35–40°, сложенный, как отмечалось (табл. 1), тремя пачками песчаных отложений и являющийся ареной развевания, и 3) волнистая залесенная (сосна, дуб, береза, осина) поверхность террасы – площадь аккумуляции эолового осадка (рис. 1).

Главными факторами, определяющими ход эоловых процессов, являются: 1) обрушение (осыпание) склона под влиянием волновой деятельности водохранилища в половодье, подготавливающее склон к дефляции; 2) повторяемость и скорости южных ветров в зимние сезоны года, вызывающие эоловый процесс; 3) изменчивость зарастаемости склона травой и мелкими кустарниками в летнее время, влияющая на интенсивность дефляции [7]. Указанные факторы взаимосвязаны: так, степень обрушения (осыпания) склона определяет площади его обнаженных участков и, следовательно, интенсивность дефляции в последующий зимний сезон. Но, как следует из этого, указанные факторы по времени воздействия в течение года не перекрывают друг друга. Это имеет важное значение, так как в данном случае при сопоставлении эоловых осадков с развесаемыми песками по фракциям исключается необходимость соотносить их со всем материалом обрушения и развевания

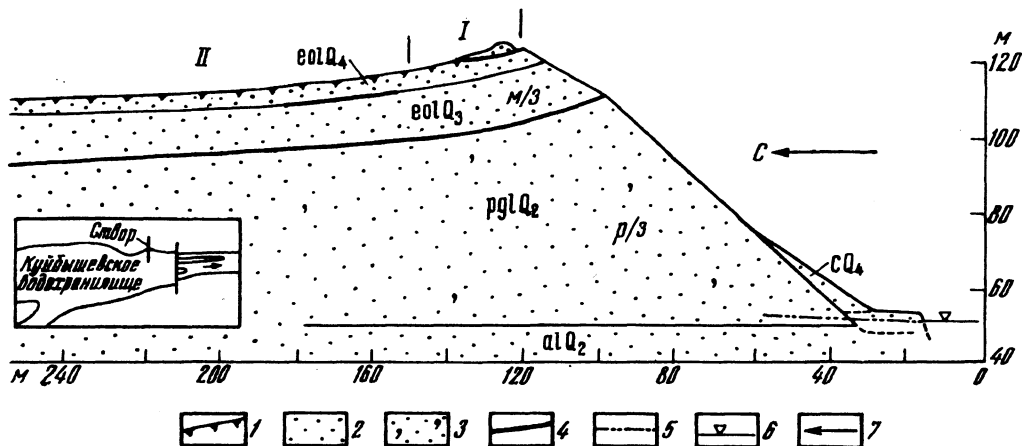


Рис. 1. Схематический геолого-геоморфологический профиль присклоновой части среднечетвертичной террасы Волги

1 – почва; 2 – песок: *м/з* – мелкозернистый, *р/з* – разнородный; 3 – пылеватый песок; 4 – погребенный почвенный горизонт; 5 – уровень грунтовых вод; 6 – уровень Куйбышевского водохранилища; 7 – направление преобладающих ветров. Возраст и генезис отложений: *сQ<sub>4</sub>* – современные коллювиальные (осыпь), *еolQ<sub>4</sub>* – голоценовые эоловые; *еolQ<sub>3</sub>* – верхнечетвертичные эоловые, *ргlQ<sub>2</sub>* – среднечетвертичные перигляциальные, *alQ<sub>2</sub>* – среднечетвертичные аллювиальные. I, II – номера расчетных блоков. На вставке – расположение створа наблюдений

склона, т.е. эоловый процесс, проходящий зимой, совершенно изолирован от процессов переработки склона, проходящего весной и летом.

Эоловые процессы ежегодно идут с переменной интенсивностью. Поэтому данные за один год или даже ряд лет не могут быть показательными. Учитывая это, для решения поставленной задачи – выявить баланс по фракциям грунтовых частиц, развеваемых и отложенных ветром, – взят промежуток времени 10 лет (с 1959 до 1969 г.), когда были проведены наиболее детальные определения мощности (толщины) эолового осадка и установлен его гранулометрический состав. Результаты исследований за еще больший промежуток времени на участке берега протяженностью около 5 км были обобщены в статье [7], где были определены объем вынесенного ветром осадка и доля дефляции в переработке берега. Вопрос баланса по фракциям там не рассматривался.

Исходя из отмеченной выше "изолированности" эолового процесса зимой от процесса перерформирования склона, проходящего в весеннее время, задача выявления соотношения содержания фракций в эоловом осадке и в развеваемых песках склона сводится к установлению количества и состава эоловых осадков на поверхности террасы. Количество развеваемых грунтов на склоне с целью сопоставления их с эоловыми осадками принимается таким же. При этом предполагается, что состав их может быть изменен за счет осыпания более крупных зерен песка.

При установлении объема эолового осадка определенную трудность представляет определение его количества в зоне аккумуляции. Объем песков, отложенных на поверхности террасы непосредственно у склона можно было установить замерами, так как характерной особенностью их является повышенная мощность [7]. Определение толщины пылеватоглинистого осадка лишено этой простоты. Толщину его за 10 лет можно только вычислить на основе визуальной фиксации толщины ежегодно выпадаемого осадка. Существо вопроса в том, что после отложения пыли из воздуха в снег, весной, после его стаявания, пыль осажается на листья прошлогоднего осеннего листопада. В это время, до первого дождя, можно установить визуально состав и толщину слоя пыли, а также отобрать пробы на определение гранулометрического состава. После прохождения первого же дождя осадок смывается с листьев в почву или уносится дождевыми струями по склонам древнеэолового рельефа в понижения и западины, где отделить его уже невозможно. Поэтому результаты накопления пыли за зиму можно определить только весной в течение одной-двух недель апреля. На основе записей в полевых дневниках получены значения мощности эолового

Мощность эолового осадка в зоне пыли

Расстояние от бровки склона террасы, м	Мощность осадка в среднем за год, мм	Мощность осадка за 10 лет после приведения к плотности песков, мм
180–330	1,3	4,3
330–480	1,1	3,7
480–850	0,8	2,7
850–1600	0,5	1,7
1600–2600	0,3	1,0

осадка, приведенные в табл. 2. Налет пыли толщиной менее 0,5–0,3 мм простирался более чем на 3 км в глубь террасы от ее склона, но отобрать здесь пробы на определение гранулометрического состава было уже практически невозможно.

Указанные среднегодовые значения толщины слоя в изученной зоне характеризуют осадок весьма рыхлого сложения. Для того, чтобы выполнить корректные расчеты, необходимо привести плотность новообразованного осадка к плотности эоловых песков у уступа террасы, среднее значение которой, по данным исследований, равно  $1,50 \text{ г/см}^3$ . Так как определить плотность выпавшего в зоне пыли осадка практически невозможно, то оно ориентировочно принимается как  $0,5 \text{ г/см}^3$ . На основе соотношения плотности эоловой пыли и плотности песков у склона террасы получены скорректированные значения толщины осадка, выпавшего за 10 лет в зоне пыли.

Определение количества эолового осадка на поверхности террасы проведено по створу, нормальному к уступу террасы. Ширина полосы опробования 1 м. В связи с тем, что гранулометрический состав эолового осадка в глубь террасы постепенно изменяется, в данной полосе нами выделены семь участков-блоков, имеющих разную протяженность. В каждом из них определен средний гранулометрический состав осадка, а также объемы и распределение по фракциям. После расчетов объемов по блокам найден общий объем осадка и его распределение по фракциям. Все эти данные приводятся в табл. 3. Как видно из таблицы, общий объем эолового осадка в метровой полосе на протяжении 2600 м от уступа террасы составил за 10 лет  $69,87 \text{ м}^3$ . Так же можно проследить изменение гранулометрического состава осадка по направлению преобладающих зимних ветров. Здесь наблюдается уменьшение количества песков: среднезернистых (0,5–0,25 мм) от 14,5 до долей процента, мелкозернистых (0,25–0,1 мм) от 69,4 до 8,2%. Количество тонкозернистой фракции (0,1–0,05 мм), наоборот, увеличивается в этом направлении от 10,2 до 22–44%. Для пылевато-глинистых фракций отмечается еще более четко выраженное увеличение их количества в глубь террасы: крупной пыли (0,05–0,01 мм) от 2,4 до 38,6%, мелкой пыли (0,01–0,005 мм) от 1,2 до 13,2%, глинистых частиц (мельче 0,005) от 2,2 до 15,9%. Высокое содержание глинистых частиц характерно для дальних от уступа террасы блоков с минимальными объемами эолового материала. Общее содержание глинистых частиц ( $2,33 \text{ м}^3$ ) от общего объема осадка ( $69,87 \text{ м}^3$ ) составляет 3,3%. Это превышает содержание этой фракции в развеваемой толще всего на 1,9% и является, как будет показано ниже, следствием выветривания зерен песка.

Для определения отношения количественного содержания различных фракций в отложенных эоловых осадках к таковому в развеваемых песках необходимо суммарный объем ( $69,87 \text{ м}^3$ ) распределить по фракциям развеваемых отложений. Но развеваемые отложения склона включают несколько различных по составу пачек, т.е. можно определить лишь осредненный гранулометрический состав всей толщи. Кроме того, уступ всегда представляет собой относительно ровную поверхность и следов ежегодного зимнего развевания не видно. Поэтому рассмотрим три возможных варианта развевания.

Первый – когда формируется "призма" обрушения с постепенно уменьшающейся мощностью слоя вниз по склону, выклинивающаяся к границе развевания. Границей развевания этого, как и других вариантов, будем считать кровлю осыпей (около 50 м ниже бровки склона), где, согласно замерам скоростей ветров, отмечается зона затишья, вследствие чего эта часть склона обычно прикрыта зимой снегом. Недостатком этого варианта является относительно большое участие в развевании древнеэоловых песков из верхней части склона, не содержащих пылеватых и глинистых частиц, и, таким образом, как бы уменьша-

Гранулометрический состав и объемы эолового осадка за 10 лет (1959–1969 гг.)

№ блока, расстояние от бровки склона террасы, м	Длина блока, м	Средняя мощ- ность осадка, м	Объем осадка, м <sup>3</sup>	Едини- цы измере- ния	Фракции, мм							Коли- чество определе- ний
					1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	< 0,005	
					гранулометрический состав и объемы							
I 0–30	30	1,18	35,4	% м <sup>3</sup>	0,1 0,04	14,5 5,13	69,4 24,57	10,2 3,61	2,4 0,85	1,2 0,42	2,2 0,78	13
II 30–180	150	0,20	30,00	% м <sup>3</sup>	0,1 0,03	10,1 3,03	59,1 17,73	19,4 5,82	5,9 1,77	1,9 0,57	3,5 1,05	9
III 180–330	150	0,0043	0,65	% м <sup>3</sup>	– –	4,5 0,03	40,3 0,26	30,7 0,20	14,7 0,10	3,7 0,02	6,1 0,04	10
IV 330–480	150	0,0037	0,56	% м <sup>3</sup>	– –	0,2 –	21,7 0,12	44,3 0,25	21,9 0,12	4,7 0,03	7,2 0,04	6
V 480–850	370	0,0027	0,99	% м <sup>3</sup>	– –	0,5 –	21,3 0,21	30,2 0,30	28,5 0,28	7,6 0,08	11,9 0,12	11
VI 850–1600	750	0,0017	1,27	% м <sup>3</sup>	– –	1,8 0,02	18,2 0,23	25,3 0,32	35,3 0,45	8,6 0,11	10,8 0,14	5
VII 1600–2600	1000	0,0010	1,00	% м <sup>3</sup>	– –	– –	8,2 0,08	24,1 0,24	38,6 0,39	13,2 0,13	15,9 0,16	4
Всего			69,87	м <sup>3</sup>	0,07	8,21	43,20	10,74	3,96	1,36	2,33	

Гранулометрический состав и объемы развеваемых отложений по фракциям

Показатели	Фракции, мм							Общий объем, м <sup>3</sup>
	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05– 0,01	0,01– 0,005	< 0,05	
Содержание, %	1,2	26,9	51,5	16,0	1,7	1,3	1,4	69,87
Объемы, м <sup>3</sup>	0,84	18,79	35,98	11,18	1,19	0,91	0,98	
Отношение объемов золотых осадков к развеваемым, %	8	44	120	96	333	149	238	

ется доля этих частиц в развеваемых отложениях. Объемы развевания древнезолотых и перигляциальных песков в этом варианте почти одинаковы (1:1).

В качестве второго варианта рассмотрен случай, когда развевание идет более или менее равномерно по всему склону, т.е. как бы в форме плоскостной дефляции. В связи с этим увеличивается доля пылеватых и глинистых частиц в развеваемых отложениях, так как отношение развеваемых объемов древнезолотых и перигляциальных песков в этом варианте составляет 1,5:3,5.

Третий вариант предполагает очаговое развевание произвольной формы, но только в пределах пачки перигляциальных песков. Он мало вероятен, но его необходимо рассмотреть, так как при этом происходит максимально возможное участие в развеивании пылеватых и глинистых частиц.

Для определения объемов по фракциям развеваемого грунта в третьем варианте взяты гранулометрический состав перигляциальных песков из табл. 1. Для двух первых вариантов были найдены средний (вариант 1) и средневзвешенный (вариант 2) гранулометрические составы, исходя из отмеченных выше соотношений объемов двух пачек. Суммарные объемы для всех вариантов одинаковы – 69,87 м<sup>3</sup>.

На основании изложенного определены объемы по фракциям и проведены сопоставления суммарного объема золотого осадка по фракциям (табл. 3) с соответствующими объемами развеваемых песков. В результате этого выявилось, что во всех вариантах максимальное относительное увеличение объема золотого осадка относится к фракции крупной пыли. В порядке рассмотренных вариантов развеивания они составили 471; 333 и 236%. Принципиальное значение имеет последний показатель относительного количества крупной пыли, превышающий ее количество в развеваемых песках более чем в 2 раза и доказывающий беспорность выветривания в ходе дефляции, так как в третьем варианте обеспечивалось бы максимальное участие в развеивании перигляциальных песков, содержащих пылеватые и глинистые частицы. Но этот вариант рассмотрен лишь для доказательства этого предположения и, по существу, не является объективным, так как не учитывает участия в развеивании древнезолотых песков. С учетом высказанных выше замечаний в отношении первого варианта развеивания, наиболее объективным надо считать второй вариант. Поэтому дальнейшие расчеты и сопоставления приведем для него (табл. 4).

Важнейшей особенностью, как уже отмечено, является повышенное (более чем в 3 раза – 333%) содержание фракции крупной пыли в золотом осадке по сравнению с развеваемыми песками. Менее значительные превышения отмечаются для фракций мелкой пыли (149%) и глинистых частиц (238%). В абсолютном исчислении, как следует из разности объемов золотого осадка (табл. 3) и развеваемых отложений (табл. 4), прирост количества пылевато-глинистых частиц составил 4,57 м<sup>3</sup> (в том числе крупной пыли 2,77 м<sup>3</sup>), т.е. 60,6%. Соответственно общее количество пылевато-глинистых частиц в золотом осадке увеличилось до 7,65 м<sup>3</sup>, что составляет 11% от всего осадка. В развеваемых отложениях доля пылевато-глинистых частиц составляла 4,4% (табл. 4).

Для песков картина несколько иная. Доля участия в развеивании крупно- и среднезернистых песков небольшая (8 и 44%), что вполне объясняется затрудненностью их переноса из-за крупности частиц. Для мелкозернистых песков, наоборот, установлено увеличение их количества по отношению к развеваемым осадкам до 120%, что соответствует увеличению объема на 7,22 м<sup>3</sup>. Большое количество перенесенных ветром

частиц этого песка объясняется тем, что они слагают самую верхнюю часть склона, наиболее подверженную дефляции. Для тонкозернистого песка отмечается почти полное совпадение объемов в развеваемых и перетолженных ветром осадках.

Приведенные данные показывают, что достаточно резкое расхождение количества отложенных ветром пылевато-глинистых частиц, в особенности, крупной пыли, с содержанием их в исходных песках можно объяснить только выветриванием зерен песка с последующим их дроблением.

С целью подтверждения этого вывода на основе определенных объемов эолового осадка был проведен расчет гипотетического гранулометрического состава развеваемой толщи при условии отсутствия выветривания зерен песка. В данном случае установленное в эоловом осадке количество пылеватых и глинистых частиц (табл. 3) необходимо полностью отнести за счет развеивания перигляциальных песков, так как древнеэоловые пески этих фракций не содержат. В итоге получился бы абсурдный результат, так как количество глинистых частиц ( $2,33 \text{ м}^3$ ), отнесенное к объему перигляциальных отложений ( $69,87 \times \frac{3,5}{5} = 48,91 \text{ м}^3$ ), составило бы 4,8%, т.е. вся перигляциальная пачка представляла бы супесь, что противоречит действительности.

Помимо приведенного сопоставления, необходимо рассмотреть еще два вопроса, связанных с дефляцией на склоне в зимних условиях, подтверждающих изложенное выше. Первый из них связан с образованием осыпи при дефляции. Из сопоставлений по пескам (табл. 4) видно неполное развеивание наиболее крупных песков: крупнозернистых – 8%, среднезернистых – 44%. Разумно предположить, что недостающие до 100% доли этих фракций поступили в осыпь. Поскольку образование осыпи на склоне террасы явление кратковременное, появляющееся при дефляции зимой и перестраивающееся при подмыве берега в паводок, логично пользоваться для оценки среднегодовыми показателями объемов. Абсолютное количество материала в осыпи определяется по разности среднегодовых объемов развеваемого грунта (табл. 4) и эоловых осадков (табл. 3) и равно для крупнозернистых песков  $0,077 \text{ м}^3$ , а для среднезернистых –  $1,058 \text{ м}^3$ , что в сумме составляет 14% от переработанного зимой общего объема песков ( $6,987 + 1,135 = 8,122 \text{ м}^3$ ). Из приведенных расчетов видна весьма высокая доля развеивания и выноса на террасу материала по отношению к его общему объему, переработанному ветром (76% или 0,76). Этот показатель (коэффициент дефляции) объясняется тем, что ветер является мощным фактором дефляции зимой. Влияет ли осыпание материала на количество пылевато-глинистых частиц в эоловом осадке? Прямых признаков этого нет. Казалось, такое влияние может проявляться косвенно, через изменение гранулометрического состава. Поэтому был проведен перерасчет состава и объемов осадка по двум первым блокам, где имеются, как и в осыпи, среднезернистые пески. При этом условно осыпь была включена в состав эолового осадка. За счет увеличения количества среднезернистого песка было получено небольшое уменьшение процентного состава пылевато-глинистых частиц. Но при распределении завышенного за счет материала осыпи общего объема осадка количество пылевато-глинистых частиц осталось прежним или даже повышенным. Это указывает на то, что содержание этих частиц не зависит от объема формируемой у подножия осыпи.

Второй вопрос также касается достоверности установленных объемов пылевато-глинистых частиц в эоловом осадке. Проведенное сопоставление количества крупной пыли в эоловом осадке с необходимым объемом развеваемых песков на склоне при предположении, что выветривания зерен песка не существует, тоже подтверждает наши выводы. Приведем расчет для среднегодовых значений.

Для этого полученный в эоловом осадке среднегодовой объем крупной пыли –  $0,396 \text{ м}^3$  (табл. 3) – разделим на количество этих частиц в  $1 \text{ м}^3$  развеваемой толщи (согласно табл. 4 оно составляет 1,7%, или  $0,017 \text{ м}^3$ ). В результате получим объем переработанного ветром грунта –  $23,3 \text{ м}^3$ . Вычтем из него установленные ранее 14%, вошедшие в осыпь ( $3,3 \text{ м}^3$ ). В итоге количество вынесенного на террасу эолового осадка составило бы  $20 \text{ м}^3$ . Эта величина в 2,9 раза превышает фактическое среднегодовое количество эолового осадка ( $6,9 \text{ м}^3$ ), что служит доказательством нереальности принятого предположения об отсутствии выветривания. Также это привело бы к искаженным (завышенным почти в 3 раза) объемам перестроения отложений на склоне и скорости отступления бровки склона, так как количество вынесенного на поверхность террасы эолового осадка находится в определенном соотношении с количеством грунта, переработанного ветром и волнами водохранилища [7]. Отметим, что по фактическим данным, объем перерабатываемого ветром и

волнами водохранилища грунта в полосе склона шириной 1 м составляет за год 55–65 м<sup>3</sup>, а отступление бровки террасы – 0,5–1 м/год [7]. Нетрудно представить, что превышение этих показателей почти в 3 раза повлекло бы весьма внушительные обрушения на склоне, несопоставимые с существующими.

Таким образом, все перечисленное подтверждает вывод о том, что высокое содержание пылевато-глинистых частиц в оловом осадке – результат не только разветвения песков, но и, главным образом, их выветривания с дроблением зерен песка преимущественно до фракции крупной пыли (0,05–0,01 мм), частично мелкой пыли (0,01–0,005 мм) и глинистых частиц (мельче 0,005 мм).

В связи с изложенным выше необходимо обратить внимание на весьма уникальные условия механического и морозного выветривания зерен песка в уступе террасы.

Склон, подрабатываемый весной в паводки волнами водохранилища, имеет крутизну больше угла естественного откоса (до 40–45°), южную экспозицию и открыт преобладающим зимой наиболее сильным ветрам. Это обуславливает отсутствие снега на склоне в течение почти всей зимы или наличие его периодического кратковременного покрова, нередко лишь в виде отдельных очагов. Важным фактором является и то, что скорость ветра при преодолении склона возрастает в 2–2,5 раза, вследствие чего и происходит вынос снега совместно с песком на поверхность террасы [7]. Южная экспозиция обуславливает значительный солнечный прогрев склона даже при сильных морозах (минус 20–25°), сопровождающийся, по терминологии Дюнина [8], "парниковым" эффектом: лучи солнца, проникая сквозь тонкий слой снега, прогревают песок и тем обеспечивают оттаивание поверхности склона [8]. Значения температуры склона на глубине до 5–10 см в этом случае [9] изменяются в течение суток от плюсовых днем до значительных отрицательных в ночное время, а влажностный режим грунта – от жидкой влаги в виде пленок воды до расклинивающих зерна песка кристаллов льда [10]. Ежесуточное повторение действия этих факторов на протяжении зимы, по нашему мнению, и приводит к выветриванию зерен песка. В облачные дни морозное выветривание под влиянием суточного изменения температуры также имеет место, но, видимо, в меньших масштабах.

Однако парадоксально то, что несмотря на изложенное выше, в самом уступе не обнаружены признаки и результаты морозного выветривания. Сопоставления гранулометрического состава отложений, выходящих на склоне, с составом этих же отложений в скважинах, пробуренных вдали от бровки террасы, показывают однотипность их состава и, в частности, одинаковое содержание в грунте пылеватых и глинистых частиц. Поэтому неизбежно напрашивается вывод о том, что заключительная стадия выветривания – дробление зерен песка – происходит в воздухе.

Указания на явление дробления зерен песка в воздухе при положительных температурах в пустынях при кристаллизации солей из порогового раствора приводятся в работе Кригера [5]. В связи с этим необходимо отметить, что в нашем случае песчаные частицы, еще будучи на склоне, подвергались интенсивному морозному выветриванию и, таким образом, ослаблены и подготовлены для дробления в ветровом потоке. Для подтверждения этого отметим, что кварциты в природной обстановке после 25-кратного промораживания снижают временное сопротивление раздавливанию на 25% [11].

Как отмечалось выше, ветер, преодолевая уступ террасы, усиливается в 2–2,5 раза и представляет собой в итоге, даже в случае умеренной начальной скорости, ураганный поток невероятной силы, насыщенный большим количеством песка и снега. Но, поскольку песчинки предварительно подверглись на склоне выветриванию, то они ослаблены и при соударении друг с другом распадаются на части. В этом процессе принимают участие и снежные зерна, которые по существу состоят из ледяных кристаллов. По прочности лед соизмерим со скальными породами. В литературе отмечается, что твердость льда резко повышается с понижением температуры. При –1° она равна 1,5 (тверже графита), а при –40° равна 4 (тверже мрамора). Для мгновенных нагрузок лед представляет собой упругое тело [12]. По другим источникам [1], мелкие частицы снега и льда по прочности сопоставимы с силикатами. Таким образом, отмечается взаимное сближение прочности зерен кварцевого песка и льда: уменьшение прочности песчинок в результате морозного выветривания и упрочнение кристаллов льда в результате действия низких температур.

Столкновение кристалликов льда, образующих снежинки, с зернами песка, как и зерен песка между собой, наибольший эффект дает при наиболее сильных ветрах. Поэтому количество образующейся в воздухе крупной пыли, как и более мелких частиц, перемененно и зависит от скорости и повторяемости ветров. Для подтверждения этого приведем следующие данные.

Абсолютный прирост пылеватых и глинистых частиц в зависимости от интенсивности ветров (м<sup>3</sup>)

Фракции	Ветры		
	слабые	средние	сильные
Крупная пыль	0,017	0,28	0,37
Мелкая пыль	0,005	0,05	0,07
Глинистые частицы	0,008	0,13	0,15

Во-первых, рассмотрим зависимость прироста количества крупной пыли от интенсивности ветров. Для выявления этой зависимости дополнительно к установленным объемам золотого осадка за 10 лет (табл. 3) были проведены аналогичные расчеты за три года при крайних значениях интенсивности зимних южных ветров: проанализированы осадки за три года наиболее сильных ветров (средняя скорость 5,9 м/с, повторяемость в среднем 96 раз за сезон) и за три года слабых ветров (средняя скорость 4,8 м/с, повторяемость 63 раза). Данные о скорости и повторяемости ветра были получены в гидрометеорологической обсерватории г. Тольятти, площадка наблюдений которой находилась на высокой террасе вблизи от створа наших наблюдений.

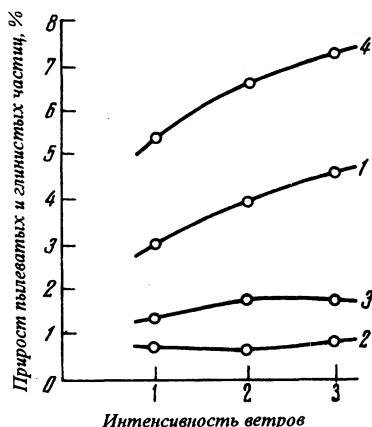
Нет необходимости повторять методику расчета, подробно изложенную при установлении объемов осадка за 10 лет. Отметим только, что суммарная толщина осадка за три года в зоне осаднения пыли, приведенная к плотности песков, для сильных ветров составила 1,8–0,6 мм, для слабых ветров – 0,2–0,12 мм, причем для последних опробование проводилось не далее 600 м от уступа террасы. Показатели для ветров средней интенсивности определены как среднегодовые из табл. 3. В результате получены объемы золотого осадка для ветров различной интенсивности: 0,56; 6,98 и 8,07 м<sup>3</sup>. Объемы абсолютного прироста пылеватых и глинистых частиц за год приведены в табл. 5. Из приведенных данных видно, что для крупной пыли отмечается наибольшее увеличение абсолютного прироста в зависимости от интенсивности ветров. Для мелкой пыли и глинистых частиц увеличение небольшое.

Показательным является относительный прирост этих фракций к общему объему осадка, указывающий на зависимость их количества от интенсивности ветров. Данные относительного прироста пылеватых и глинистых частиц осадка (в %) приводятся на рис. 2 в виде графиков. Из рисунка видна почти прямая зависимость увеличения относительного прироста крупной пыли от интенсивности ветров. Значения ее в порядке увеличения интенсивности ветров составляют 3,0, 4,0 и 4,6%. Для мелкой пыли и глинистых частиц увеличения относительного прироста в зависимости от интенсивности ветров не отмечается. Для них оно почти постоянно и не превышает для глинистых частиц 1,8%, для мелкой пыли составляет менее 1%. Из изложенного следует, что общее увеличение относительного прироста всех этих фракций (кривая 4) определяется увеличением количества крупной пыли при возрастании интенсивности ветров.

Во-вторых, существует обратная зависимость крупности зерен золотого осадка в зоне пыли от интенсивности ветров. Эта зависимость была отмечена ранее [13], но объяснение причин ее было неполным, так как оно увязывалось только с составом исходных для развевания песков без сопоставления объемов осадков по фракциям. Суть вопроса в следующем. При сопоставлении крупности зерен осадка, отложенного слабыми и сильными ветрами на одинаковых расстояниях от уступа террасы (300–600 м), выявилось, что осадок слабых ветров представлен более крупными зернами – тонкозернистым песком, а сильных ветров – мелкими – крупной пылью. В упомянутой статье это четко видно по кумулятивным кривым гранулометрического состава на расстоянии 300, 400 и 600 м от уступа террасы для зимних сезонов 1961–1962 гг. (сильные ветры) и 1963–1964 гг. (слабые ветры). Такая необычная зависимость крупности частиц золотого осадка от скорости ветров объясняется тем, что при сильных ветрах увеличивается количество частиц крупной пыли в результате дробления песчаных зерен. При массовом образовании ее происходит насыщение ветрового потока пылью, ослабление его скорости и осаждение пыли на поверхности террасы вблизи от уступа.

Рис. 2. Зависимость среднегодового относительного прироста пылеватых и глинистых частиц от интенсивности ветров.

1 – крупная пыль, 2 – мелкая пыль, 3 – глинистые частицы, 4 – сумма этих фракций. Интенсивность ветров: 1 – слабые, 2 – средние, 3 – сильные



Приведенные в статье данные об особенностях дефляции на склоне и проведенных сравнениях эолового осадка с развеваемыми отложениями по фракциям гранулометрического состава объясняют образование крупной пыли и в меньшем объеме мелкой пыли и глинистых частиц в результате морозного выветривания зерен песка на склоне с последующим дроблением его в ветровом потоке. Масштабы этого явления в современных условиях невелики, но сам факт существования подобного явления позволяет говорить о возможности трансформации его результатов на более суровые условия климата последнего ледникового времени, когда происходило формирование основных толщ лёсса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кригер Н.И. Лёсс, его свойства и связь с географической средой. М.: Наука, 1965. 296 с.
2. Горецкий Г.И. Формирование долины р. Волги в раннем и среднем антропогене. Аллювий Пра-Волги. М.: Наука, 1966. 412 с.
3. Москвитин А.И. Четвертичные отложения и история формирования долины р. Волги в ее среднем течении. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Тр. ГИН. Вып. 12. 211 с.
4. Ключарев Н.И. О рельефе и строении эоловых песков на Жигулевском левобережье Волги // Геоморфология. 1975. № 3. С. 59–65.
5. Кригер Н.И. Лёсс. Формирование просадочных свойств. М.: Наука, 1986. 132 с.
6. Минервин А.В. Моделирование условий формирования крупнопылеватых частиц лёссовых пород // Инж. геология. 1980. № 1. С. 51–60.
7. Ключарев Н.И. Условия дефляции на склоне высокой террасы Волги у г. Тольятти // Геоморфология. 1997. № 3. С. 63–68.
8. Дюнин А.К. В царстве снега. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1983. 161 с.
9. Коломенский Н.В. Методические указания по изучению процессов выветривания горных пород для инженерно-геологических целей. М.: Госгеолтехиздат, 1952. 68 с.
10. Черняховский А.Г. Климатическая зональность элювиального процесса // Процессы континентального литогенеза. М.: Наука, 1980. Тр. ГИН АН СССР. Вып. 350. С. 28–59.
11. Лапердин В.К., Тржинский Ю.В. Экзогенные геологические процессы и сели Восточного Саяна. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. 104 с.
12. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
13. Ключарев Н.И. Зависимость гранулометрического состава эоловых осадков от скорости ветра и слоения развеваемой толщи // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1977. № 4. С. 101–105.

Самарагидропроект

Поступила в редакцию  
26.05.97

#### LOESS DUST UPRISING IN THE PROCESS OF SLOPE DEFLATION

N.I. KLYUCHAREV

S u m m a r y

While gravitational processes on slopes occur during warm period, deflation takes place in winter. It makes possible to correlate eolian deposits with deflated material by granulometric composition. Coarse dust, to lesser extent thin dust, and clay particles appear due to frost weathering of sandy grains on the slope and their fragmentation in the windblast. The amount of eolian particles depends on intensity of wind.