

УДК 556.537

## МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА АКТИВНЫХ ГРЯД В РУСЛЕ РЕКИ ТЕРЕК<sup>1</sup>

© 2017 г. **Н. И. Алексеевский**, А. Ю. Сидорчук

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

E-mail: [aleksey.sidorchuk@geogr.msu.ru](mailto:aleksey.sidorchuk@geogr.msu.ru)

Поступила в редакцию 04.09.2015 г.

В низовьях Терека в период летних паводков формируются активные гряды трех основных классов — рифелей, дюн первого и дюн второго порядка (от более мелких к более крупным), которые обычно образуют неполную иерархию. Морфология гряд существенно стохастична, может быть адекватно описана функциями распределения вероятностей характеристик гряд для некоторых узких диапазонов гидравлических характеристик потока. В то же время средние значения морфометрических характеристик гряд (длины, высоты, асимметрии) показывают устойчивые связи со скоростью и глубиной потока. Скорость перемещения активных дюн  $\sim 1$  удовлетворительно описывается модифицированной формулой Снисченко—Копалиани. Доля руслообразующих наносов, перемещающихся в форме гряд, в низовьях Терека составляет 7% стока всех руслообразующих наносов, что близко к нижнему пределу для рек с песчаным аллювием.

*Ключевые слова:* активные гряды, классификация, реки с паводковым режимом, сток руслообразующих наносов.

DOI: 10.7868/S0321059617010035

Гряды в речном русле и в больших лабораторных лотках могут быть двух основных типов: активного перемещения (активные гряды) и пассивного перемещения (пассивные гряды) [11]. Примеры исследования морфологии и динамики пассивных гряд многочисленны, так как на реках с коротким половодьем (часто с ледоходом) и продолжительной меженью удастся измерить только пассивные гряды (во время межени). В больших (а тем более в малых) лабораторных лотках также обычно наблюдаются пассивные гряды из-за малых относительных глубин потока. Среди исследователей бытует мнение, что гряды в речном русле всегда асимметричны, имеют треугольную форму с крутым низовым откосом и пологим верховым, их перемещение обусловлено движением влекомых наносов и в результате этого перемещения в аллювиальных толщах формируется косая слоистость (например, [9]).

Изыскания на реках, протекающих в тропиках и имеющих продолжительное половодье, показывают, что в период высокой воды и больших относительных глубин в русле формируются активные гряды. Эти гряды симметричны, имеют эллипсоидную форму с выпуклыми верховым и низовым откосами; их перемещение обусловлено

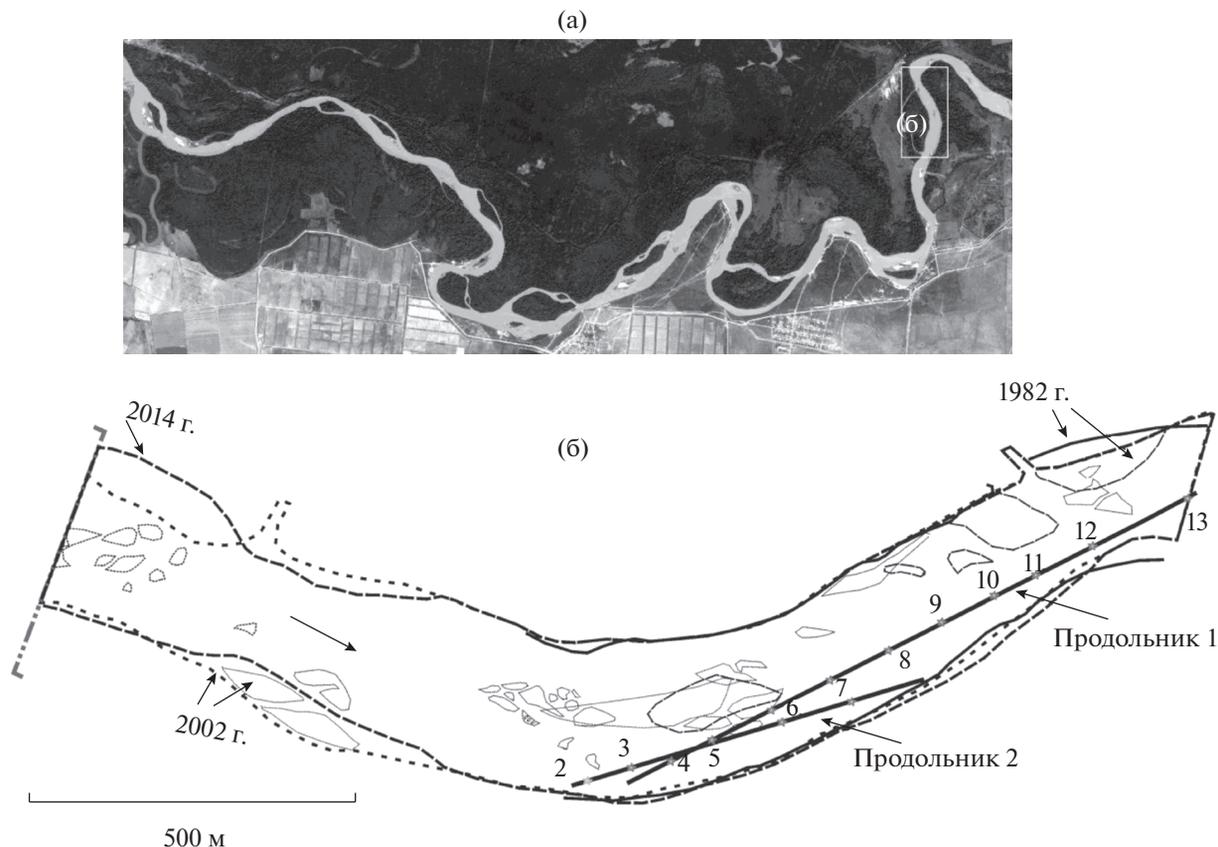
динамикой волнообразной структуры потока, образующей гряду, в результате этого перемещения формируется сток влекомых наносов, а в русловом аллювии — волнистая почти горизонтальная слоистость [3, 11, 16, 17].

Исследование активных гряд также возможно на реках с мощными летними паводками. В России это, в первую очередь, реки северо-кавказского и восточно-сибирского типов, по Б.Д. Зайкову [6]. Типичный пример рек с гидрологическим режимом северо-кавказского типа — Терек и его притоки. Наиболее мощные паводки формируются в низовьях Терека (ниже устья р. Сунжи), где преобладает летнее дождевое питание (в среднем почти 33% годового стока, по [7]). Расходы воды и наносов во время этих паводков могут в отдельные годы превосходить расходы во время половодья. Во время одного из летних паводков были собраны данные о стоке воды и наносов и о русловых переформированиях на 15-километровом участке нижнего Терека (ниже устья р. Сунжи). Эти материалы лишь частично опубликованы [2, 10], а в них содержится очень редкая для рек России информация о морфологии и динамике активных русловых гряд.

### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

На 15-километровом участке р. Терек ниже устья Сунжи исследована серия из семи излучин

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Госзаказа по теме “Эволюция и трансформация эрозионно-русловых систем в условиях изменения природной среды и антропогенных нагрузок”.



**Рис. 1.** Участок исследований в 1982 г. на р. Терек ниже устья р. Сунжи на снимке SPOT 5 от 02.09.2006 (а) и положение промерных створов (1–13) для исследования морфологии и динамики комплекса русловых гряд (б). Снимок SPOT предоставлен Геопорталом МГУ.

со средними шагом и амплитудой 1300 и 600 м соответственно, средней шириной русла 260 м (рис. 1а). Измерения динамики и морфологии гряд проводились на прямолинейной вставке между двумя нижними излучинами из этой серии (рис. 1б). При сооружении нового автомобильного моста (завершенного в 2012 г.) одна крутая излучина была спрямлена прорезью, в результате чего длина этого участка русла сократилась до 11,5 км. Естественные горизонтальные переформирования этих излучин также значительны — средние за 50 лет скорости размыва берегов составляют ~ 3 м в год, при локальных средних скоростях — 10–15 м в год [2]. Однако берега прямолинейного участка русла, где проводились измерения гряд, сохраняли практически полную стабильность в 1982–2014 гг. (рис. 1б), так что данные 1982 г. вполне репрезентативны для настоящего времени. Русловые отмели меняли свое положение год от года, но конфигурация рельефа оставалась сходной: прямолинейное русло с осередком (обычно подводным) — в верхней части участка, соответственно, здесь расположены две плесовые ложины, которые сливаются в одну в нижней части участка.

Промер глубин проводился 22 июля — 30 августа 1982 г. эхолотом ПЭЛ-3 по двум продольным профилям длиной 970 и 500 м, закрепленным береговыми створами. Расстояния на продольниках определялись с помощью 13 поперечных береговых створов, расставленных через 60–100 м. Промер осуществлялся сплавом по течению, при этом фиксировалась средняя между поперечными створами поверхностная скорость потока. Два раза в сутки (утром и вечером) измерялся рельеф дна русла на осередке, в правой и в единой плесовых ложинах. Такая частота промера позволяла достоверно идентифицировать на разновременных эхограммах одни и те же крупные гряды, для них определялась скорость перемещения. Для всех гряд определялись характеристики гидравлические (средняя скорость потока и глубина над грядой) и морфометрические (общая длина, длины верхового и низового откосов, высота гряды). Всего обработано 57 промеров (5927 гряд) на длинном продольнике 1 и 44 промера (3481 гряда) — на коротком продольнике 2.

## ГИДРОЛОГО-ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НИЖНЕГО ТЕРЕКА

Нижний Терек в районе исследований имеет площадь водосбора 37400 км<sup>2</sup>, средний расход воды 294 м<sup>3</sup>/с, средний максимальный расход 970 м<sup>3</sup>/с, абсолютный наблюдаемый максимум расхода воды составил ~2000 м<sup>3</sup>/с во время паводка в июне 1914 г. Среднегодовой расход взвешенных наносов оценивается в 580 кг/с (18.3 млн т в год), но его изменчивость велика, например в 2002 г. сток наносов превышал 63 млн т [5].

Измерения 1982 г. проводились на пике паводка (с расходами воды 570–670 м<sup>3</sup>/с), который длился с 22 июля по 3 августа. Затем начался медленный спад, и 30 августа расход воды составил 360 м<sup>3</sup>/с. Скорость потока изменялась вдоль продольников и во времени от 0.12 до 3.5 м/с, глубины – от 0.4 до 10.3 м, числа Фруда – от 0.02 до 0.9.

Наносы в низовьях р. Терек целесообразно разделять на транзитные (с диаметром частиц <0.05 мм), которые не участвуют в переформировании рельефа русла (их практически нет в русловом аллювии), и на руслообразующие, которыми сложены формы руслового рельефа. Транзитные наносы перемещаются во взвеси, а руслообразующие – как во взвеси, так и в виде гряд. Расход транзитных наносов на пике паводка в створе 12 достигал 6000 кг/с при концентрации транзитных наносов, равной 8.9 кг/м<sup>3</sup>, а к концу работ он снизился до 370–440 кг/с при концентрации 1.0–1.2 кг/м<sup>3</sup>. Временная изменчивость концентрации транзитных наносов была велика: на пике паводка в разные периоды измерений в узком диапазоне расходов воды (620–670 м<sup>3</sup>/с) она изменялась в 4.5 раза – от 2 до 9 кг/м<sup>3</sup>, при меньших расходах воды ее изменчивость уменьшилась до 2 раз. При этом пространственная изменчивость концентрации транзитных наносов в пределах исследованного участка была относительно невелика и в среднем составляла 20% (при максимуме в 60%). В среднем 50% транзитных наносов приходится на фракции диаметром 0.05–0.01 мм, 20% – размером 0.01–0.005 мм и 30% – мельче 0.005 мм. Анализ большого количества данных о гранулометрическом составе взвешенных наносов на разных водомерных постах вдоль нижнего Терека показывает, что в общей концентрации взвешенных наносов доля транзитных наносов составляет в среднем ~60%. Таким образом, их годовой сток в районе исследований оценивается в 11 млн т. Транзитные наносы формируются на водосборе реки, в русле нижнего Терека они практически не откладываются (только на пойме), и их связь с гидравлическими характеристиками руслового потока – косвенная.

Концентрация руслообразующих наносов, напротив, зависит от локальных условий формиро-

вания в русле. Придонная (на высоте  $\Delta$  над дном) концентрация взвешенных руслообразующих наносов  $i$ -й фракции  $C_i(\Delta)$  определяется долей наносов  $i$ -й фракции в составе донных грунтов  $p_i$ , гидравлической крупностью взмываемых частиц  $\omega_i$  и скоростью потока  $U$ . Донные грунты на исследованном участке – песчаные со средневзвешенным диаметром 0.4 мм: в среднем 20% составляют крупные пески диаметром 1–0.5 мм, ~60% – средние пески диаметром 0.5–0.25 мм, 20% – мелкие пески диаметром 0.25–0.1 мм и ~2% – тонкие пески диаметром 0.1–0.05 мм. Распределение наносов по фракциям близко к логнормальному. Для нижнего Терека получена следующая эмпирическая связь [2]:

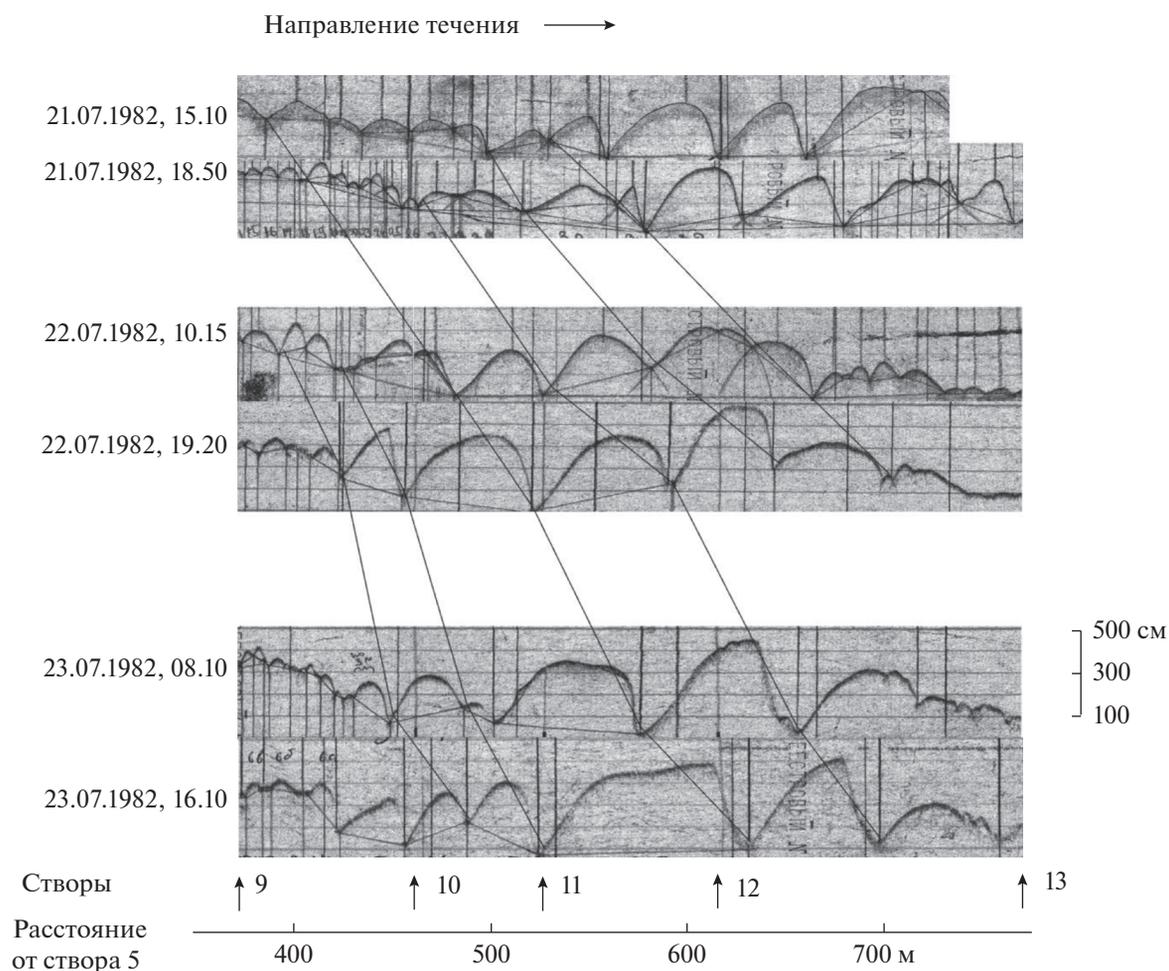
$$C_i(\Delta) = 1.2 \times 10^{-5} \left( \frac{U}{\omega} \right)^3 p_i, \quad (1)$$

здесь величина  $\Delta$  обусловлена высотой рыбовидного груза, на котором крепился патрубок вакуумного батометра, и составила 12–15 см. Распределение руслообразующих наносов по глубине потока хорошо описывается формулой Рауза–Великанова [4]. Временная и пространственная изменчивость концентрации руслообразующих наносов и их доли в общей концентрации взвеси достаточно существенные. Так, для условий пика паводка 21 июля 1982 г. доля руслообразующих наносов (диаметром >0.05 мм), измеренная в 13 створах, варьировала от 16 до 56% средней в створе концентрации взвешенных наносов. Соответственно, сильно варьирует гранулометрический состав взвешенных руслообразующих наносов, хотя преобладают обычно наносы фракции 0.25–0.1 мм (до 60% руслообразующих наносов).

В среднем доля руслообразующих наносов в общей концентрации взвешенных наносов составляет ~40%, и их годовой сток в районе исследований оценивается в 7.3 млн т.

## ГРЯДОВЫЙ РЕЛЬЕФ В РУСЛЕ НИЖНЕГО ТЕРЕКА

Для низовьев Терека, как и для многих других рек с песчаным аллювием, характерно сложное иерархическое строение грядовых русловых форм. Можно насчитать до шести уровней иерархии гряд. Большие гряды – побочни и осередки длиной в среднем 600 м – обычно осложнены средними грядами – как более крупными со средней длиной 230 м, так и более мелкими со средней длиной 90 м, моделирующих более крупные. Большие и средние гряды затоплены в высокую воду, при малых расходах воды обсыхают и определяют конфигурацию межженного русла. На этот комплекс накладываются малые и самые малые гряды, которые могут быть трех иерархических уровней: наиболее крупные дюны второго поряд-



**Рис. 2.** Морфология и динамика активных дюн\_1 нижнего Терека на продольнике 1 (створы 9–13) на подъеме паводка при уровне 800 см условно. Расстояния даны от створа 5.

ка (дюны\_2), более мелкие дюны первого порядка (дюны\_1) и самые малые гряды – рифели. Малые и самые малые гряды практически всегда находятся под водой. Повторными промерами летом 1982 г. исследованы именно эти типы донных гряд.

#### *Классификация гряд*

Обычная иерархия малых и самых малых гряд на реках с песчаным аллювием выглядит следующим образом [1, 12, 14]: дюны\_2 осложняют средние гряды, на дюнах\_2 расположены более мелкие дюны\_1, которые, в свою очередь, моделируются рифелями. В низовьях Терека во время паводков ситуация иная. На отдельных участках русла возникает полная трехчленная иерархия гряд, здесь возможно применение вышеизложенной классификации. На других участках русла

(или на этом же, но в другое время) полная иерархия гряд не наблюдается: она может быть двухчленной или отсутствовать вообще. Такая неполная структура грядового рельефа реализуется в низовьях Терека наиболее часто (рис. 2), поэтому для классификации гряд в таких структурах необходим следующий дополнительный анализ рельефа русла.

Целесообразно предварительно дать грядам нижнего Терека специальные индексы. Для случая трехчленной иерархии будем обозначать самые крупные гряды как гряды\_003, на них расположены гряды\_023, и на верхнем уровне – гряды\_123. При двухчленной иерархии на нижнем уровне будут гряды\_020, на верхнем – гряды\_120. В случае одночленной структуры руслового рельефа употребляется индекс – гряды\_100.

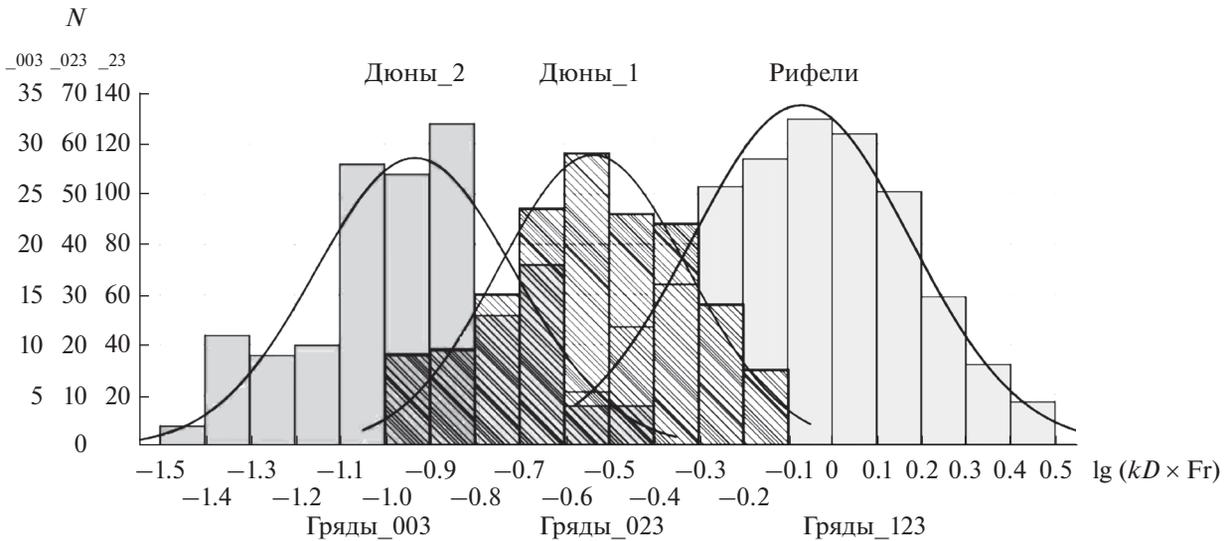


Рис. 3. Гистограммы и графики аппроксимирующих функций значений  $\lg(2\pi DFr/L)$  для гряд\_003, \_023 и \_123.

Теоретические исследования происхождения грядового рельефа речного русла, проведенные методом малых начальных возмущений, показали, что для рифелей безразмерное волновое число  $k_r D = 2\pi D/L_r$  связано с числом Фруда  $Fr = U/\sqrt{gD}$  обратно-пропорциональной зависимостью [8, 12]:

$$k_r D = \frac{1}{Fr}, \quad (2)$$

здесь  $L_r$  – длина рифелей,  $U$  – скорость потока,  $D$  – его глубина, измеряемая как глубина над гребнем гряды плюс половина высоты гряды,  $g$  – ускорение свободного падения. Для границы между малыми и средними грядами получена формула [10]:

$$k_m D = \left(\frac{2g}{C_0^2}\right)^{0.3} \exp(-2.0Fr), \quad (3)$$

здесь  $C_0$  – коэффициент в формуле Шези,  $k_m$  – волновое число для средних гряд. На диаграмме  $2\pi D/L \sim Fr$  между этими двумя линиями расположена область малых гряд, где теоретические расчеты не дают каких-либо дополнительных границ.

Эмпирические данные о трехчленной иерархической структуре дюн и рифелей в речном русле, собранные на реках с песчаным аллювием [12], подтверждают теоретические зависимости (2) и (3). Результаты измерений для гряд нижнего Терека, образующих полную трехчленную иерархию (гряды\_123, \_023 и \_003), положенные на диаграмму  $2\pi D/L \sim Fr$ , также подтверждают все ранее выделенные области при вполне объяснимой стохастичности их границ. Функции плотности вероятности для логарифмов коэффициента  $a$

$= 2\pi DFr/L$  для гряд этих классов (рис. 3) хорошо аппроксимируются (критерий Колмогорова–Смирнова 0.03–0.05) нормальным распределением (т.е. распределение значений коэффициента  $a$  описывается логнормальной функцией).

При неполной иерархии отнести гряды с индексами \_100, \_120, \_103 и \_020 к определенному классу возможно только с некоторой вероятностью. На основании размеров и гидравлических характеристик потока (по значению коэффициента  $a$ ) гряды\_100 и \_120 можно отнести и к рифелям, и к дюнам\_1, и к дюнам\_2; гряды\_103 – это и рифели, и дюны\_1; гряды\_020 – преимущественно дюны\_1. В первом приближении для региональной классификации таких гряд можно использовать гистограммы логарифмов коэффициента  $a = 2\pi DFr/L$  для гряд\_123, \_023 и \_003 (рис. 3). Количество рифелей  $n_r$  в группе из  $N$  различных гряд, объединяемых по значению  $\lg a$  (в некотором заданном диапазоне), можно оценить так:

$$n_r = N \frac{N_{123}}{N_{123} + N_{023} + N_{003}} \quad (4)$$

и выделить их из этой группы случайным образом. Для определения количества дюн\_1 в такой группе  $N_{123}$  заменяется на  $N_{023}$  в числителе формулы (4), для дюн\_2 – на  $N_{003}$ . Здесь  $N_{123}$ ,  $N_{023}$  и  $N_{003}$  – количество гряд соответствующих типов в измерениях на нижнем Тереке в этом заданном диапазоне значений  $\lg a$ , согласно гистограммам на рис. 3.

Формула (4) была применена к массивам данных о характеристиках гряд нижнего Терека, в результате гряды в неполных иерархиях тоже были классифицированы как рифели, дюны\_1 и дю-

**Таблица 1.** Характеристики нормальной функции распределения плотности вероятности логарифмов коэффициента  $a = 2\pi DFr/L$  для гряд нижнего Терека

Дюны	Число гряд	Среднее значение $\lg a$	Стандартное отклонение	Критерий Колмогорова–Смирнова
Гряды в трехчленных иерархических комплексах				
Рифели	825	−0.074	0.243	0.025
Дюны_1	305	−0.538	0.211	0.04
Дюны_2	158	−0.936	0.22	0.056
Единый массив гряд после процедуры классификации по формуле (4)				
Рифели	5840	−0.009	0.196	0.03
Дюны_1	1741	−0.451	0.195	0.05
Дюны_2	575	−0.865	0.187	0.051

ны\_2. Функции плотности вероятности для логарифмов коэффициента  $a = 2\pi DFr/L$  для всего комплекса гряд также хорошо аппроксимируются нормальным распределением со средними и среднеквадратическими значениями, близкими к тем, что получены только для гряд в трехчленных иерархических комплексах (табл. 1).

#### Морфология рифелей и дюн

Результаты обработки данных измерений на нижнем Тереке показывают (табл. 1; рис. 4), что шаг рифелей нижнего Терека для моды логнормальной функции плотности вероятности описывается формулой

$$k_r D = \frac{0.98}{Fr}, \quad (5)$$

или

$$L_r = 6.4 D Fr. \quad (6)$$

Для дюн\_1 коэффициент в формуле (5) равен 0.35, для дюн\_2 – 0.14 (рис. 4). Соответствующие коэффициенты в формуле (6) равны 17.7 и 46.0. Линейная зависимость реализуется при значениях числа  $Fr < 0.6$ , в более кинетических потоках зависимость становится экспоненциальной.

Если строить функции плотности вероятности для длин гряд в узких диапазонах скоростей ( $\Delta U = 0.5$  м/с) и глубин ( $\Delta D = 0.5$  м) потока, то логнормальное распределение выдерживается и в этом случае. Как и для дюн и рифелей на других реках [12], для нижнего Терека выявляется тесная зависимость стандартного отклонения  $\sigma$  длин гряд от средних значений  $L_{cp}$ . Ранее была получена линейная связь этих величин, т.е. коэффициент вариации  $\sigma/L_{cp}$  оставался постоянным для любых соотношений скоростей и глубин потока. Данные по Тереку, полученные для более широкого диапазона гидравлических характеристик потока, показывают, что линейная связь  $\sigma$  и  $L_{cp}$  выдержи-

вается и здесь с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.94$ . Для длин рифелей коэффициент вариации равен 0.43, для дюн\_1 – 0.28; для дюн\_2 данных для получения достоверной связи недостаточно.

Большинство гряд нижнего Терека во время паводка июля–августа 1982 г. были существенно изометричны в продольном разрезе. Для рифелей величина соотношения заложений верхового и низового откосов  $A = L_v/L_n$  в 75% случаев находится в диапазоне 0.5–2.0 и в 30% случаев – в диапазоне 0.8–1.25. Для дюн\_1 64% значений  $A$  находится в диапазоне 0.5–2.0 и 23% – в диапазоне 0.8–1.25, для дюн\_2 в этих диапазонах находится соответственно 68 и 22% значений асимметрии. Распределение вероятностей для логарифмов асимметрии  $A$  описывается функцией Лапласа (рис. 5) с хорошо выраженной модой при значениях  $\lg A \sim 0$  ( $A \sim 1$ ). В узких диапазонах скоростей и глубин потока выявляется зависимость асимметрии гряд  $\sigma$  от средних значений  $A_{cp}$ . Эта зависимость – нелинейная и аппроксимируется степенной функцией с  $R^2$ , составляющей 0.52–0.58:

$$\sigma = r A_{cp}^q. \quad (7)$$

Для рифелей  $r = 0.8$ ,  $q = 1.6$ , для дюн\_1  $r = 1.0$  и  $q = 2.0$ . Таким образом, для гряд со значениями асимметрии меньше единицы (верховой откос короче низового) коэффициент вариации асимметрии меньше, чем для гряд со значениями асимметрии больше единицы (верховой откос длиннее низового).

Изометрия гряд – важный индикатор активной стадии их перемещения. Не менее характерна для этой стадии выпуклая форма как верхового, так и низового откосов, которая наиболее явно выражена для крупных дюн (рис. 2).

Относительная высота рифелей  $h/D$  увеличивается с увеличением скорости. При скоростях потока 0.1–0.5 м/с дно русла практически ровное;

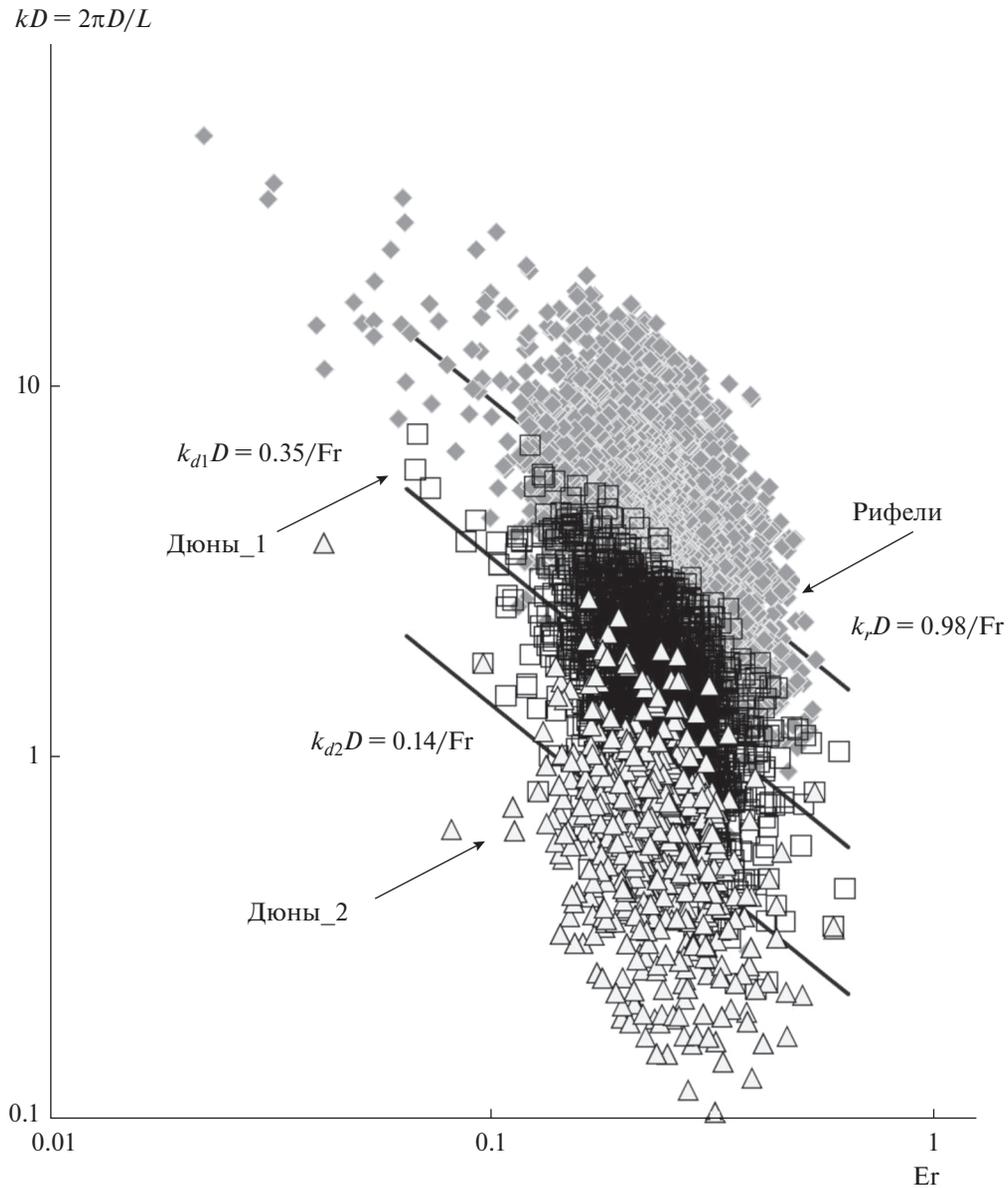


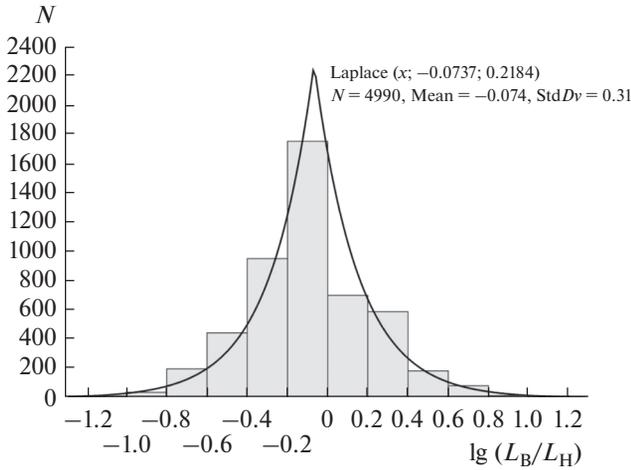
Рис. 4. Связь безразмерного волнового числа  $kD = 2\pi D/L$  для рифелей, дюн\_1 и дюн\_2 нижнего Терека с числом Фруда.

при скорости 1.3–1.5 м/с величина  $h/D$  достигает максимума; с дальнейшим увеличением скоростей относительная высота рифелей уменьшается. Отмеченная закономерность довольно слабо выражена для средних величин  $h/D$  (рис. 6а), но отчетливо проявляется в верхней огибающей поля точек. Относительная высота дюн\_1 увеличивается при росте скоростей потока до 2.5–2.7 м/с, при дальнейшем увеличении скоростей намечается тенденция к началу размыва этих гряд. Дюны\_2 продолжают увеличиваться в высоту и при скоростях потока ~3 м/с (рис. 6а). Эти закономерности хорошо выражены как для средних, так и для максимальных величин  $h/D$ . Таким образом, с увеличением скорости потока гряды упло-

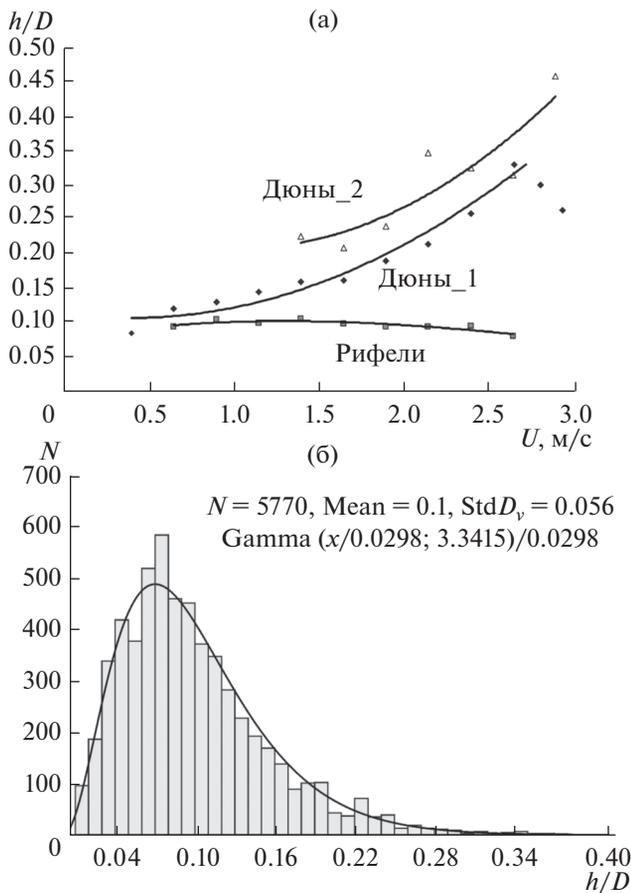
щаются, для рифелей для этого требуются меньшие скорости потока, чем для дюн\_1; для дюн\_2 в диапазоне измеренных скоростей эта тенденция практически не проявляется.

В узких диапазонах скоростей потока плотности вероятностей относительных высот гряд всех типов хорошо описываются гамма-распределением (рис. 6б). Зависимость относительной высоты гряд от средних значений  $(h/D)_{cp}$  – линейная, коэффициент вариации для рифелей равен 0.52, для дюн\_1 – 0.55.

На отмелях при понижении уровня воды в реке могут кратковременно возникать большие скорости потока – до 2.5–3.0 м/с в условиях малых глубин. Здесь гряды полностью размываются



**Рис. 5.** Гистограмма и график аппроксимирующей функции значений асимметрии рифелей нижнего Терека.



**Рис. 6.** Зависимости относительных высот гряд от скорости потока (а) и функция распределения вероятностей для относительных высот рифелей (б).

и образуется ровное дно второй стадии. В отдельных случаях при таком режиме на мелководье формируются антидюны с вогнутыми как верхним, так и низовым откосами (рис. 7).

*Динамика дюн*

Скорость перемещения гряд определялась повторными промерами на участке продольника 1 длиной 160 м между створами 10 и 12 (рис. 1, 2). Это единая плесовая лощина с равномерным потоком и выдержанными глубинами в подвалах гряд, поэтому рассчитаны средние гидравлические характеристики и скорости смещения для индивидуальных гряд за время их прохождения по этому участку (табл. 2).

Гистограмма логарифмов коэффициента  $a$  показывает, что эти гряды относятся к классу дюн\_1. Обычно одну часть времени своего существования они осложнены рифелями (гряда\_120), а другую часть времени представляют собой одиночные дюны\_1 (гряда\_100). В отдельных случаях дюны\_1 моделируют поверхность крупных дюн\_2 (на рис. 2 — ситуация утром 22 июля 1982 г.). Во всех случаях это активные гряды, их форма не претерпевает существенного однонаправленного изменения (перекоса) за время перемещения [11].

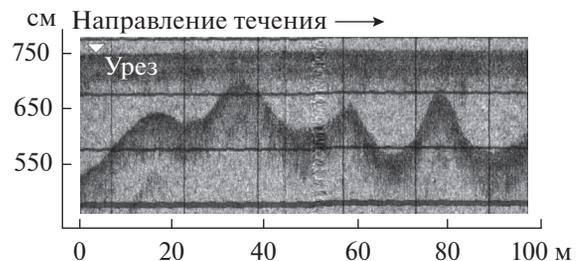
Скорость перемещения дюн\_1 ( $C_r$ , м/ч) определяется гидравлическими характеристиками потока и удовлетворительно описывается выражением, близким к формуле Снищенко–Копалиани [13]:

$$C_r = b \frac{U^3}{D}. \tag{8}$$

Среднее значение эмпирического коэффициента  $b$  в формуле (8) равно  $1.91 \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч})$ . Коэффициент имеет тенденцию увеличиваться с упрощением иерархии гряд, одиночные дюны\_1 обычно перемещаются быстрее, чем осложненные рифелями:

$$b = b_1 + b_2 p, \tag{9}$$

здесь  $p$  — доля времени  $t/T$ , где  $t$  — время, в течение которого дюны\_1 при прохождении участка дли-



**Рис. 7.** Антидюны на мелководье в русле нижнего Терека на спаде паводка.

**Таблица 2.** Морфология и динамика индивидуальных дюн\_1 нижнего Терека на профиле 1 на участке между створами 10–12 ( $N$  – количество промеров с данной дюной\_1,  $T$  – продолжительность наблюдений за перемещением данной дюны\_1,  $U$  – средняя за этот период скорость течения над дюной,  $D$  – средняя глубина потока над дюной +  $1/2$  высоты дюны,  $L$  – средняя длина дюны,  $h$  – средняя высота дюны,  $C$  – средняя скорость перемещения дюны,  $p$  – доля времени, когда дюна не была осложнена рифелями)

Номер дюны	Период наблюдений				$N$	$T$ , ч	$U$ , м/с	$D$ , м	$L$ , м	$H$ , м	$C$ , м/ч	$p$
	начало		конец									
	дата	время	дата	время								
1	22.07	10:30	22.07	19:20	3	8.8	2.25	3.9	60.84	2.77	6.49	0.33
2	22.07	10:30	23.07	8:10	4	21.7	2.51	4.6	71.03	3.1	6.22	0.25
3	22.07	17:10	23.07	16:10	4	23.0	2.62	4.57	81.92	3.53	5.23	0.25
4	23.07	8:10	24.07	13:20	4	29.2	2.29	5.22	46.94	2.47	5.41	0.75
5	23.07	16:10	24.07	15:50	3	23.7	2.53	5.2	84.89	2.77	6.1	0.33
6	25.07	9:00	25.07	12:30	2	3.5	2.53	4.75	113.4	2.45	6.16	0
7	26.07	13:40	26.07	18:40	3	5.0	2.36	7.48	45.64	2.47	4.7	0.33
8	26.07	13:40	26.07	17:10	2	3.5	2.48	7.65	114.43	2.4	3.59	0.5
9	27.07	9:00	27.07	19:10	3	10.2	2.73	6.22	104.28	2.3	5.26	0
10	28.07	9:45	28.07	17:50	3	8.1	2.48	5.17	18.32	1.4	7.5	0.67
11	28.07	9:45	29.07	18:50	5	33.1	2.29	5.3	46.92	1.52	3.37	0
12	29.07	10:40	29.07	18:50	2	8.2	2.24	5.35	37.57	1.3	5.14	0
13	29.07	10:40	30.07	17:10	4	30.5	2.02	5.84	115.34	2	3.06	0
14	30.07	13:20	01.08	15:25	4	50.1	2.07	6.44	68.31	2.13	2.14	0
15	31.07	19:20	03.08	9:25	6	62.1	2.08	7.33	32.72	2.48	2.74	0.5
16	01.08	12:15	03.08	15:25	6	51.2	2.14	7.01	40.8	2.35	2.69	1
17	01.08	12:15	03.08	15:25	6	51.2	2.19	6.36	33.09	1.62	2.74	0.5
18	03.08	9:25	03.08	15:25	2	6.0	2.2	5.93	67.33	3.05	3.52	0
19	04.08	13:40	06.08	19:20	8	53.7	2.02	6.72	40.05	2.31	2.23	0.38
20	04.08	13:40	07.08	16:07	10	74.4	2.04	6.19	44.89	2.52	2.36	0.1
21	06.08	9:45	07.08	16:07	5	30.4	2.05	5.71	60.47	2.52	2.53	0.6
22	06.08	19:20	07.08	16:07	3	20.8	2.08	5.92	54.83	1.23	2.75	0
23	07.08	9:45	09.08	18:35	3	56.8	1.96	6.32	43.81	1.7	2.5	0.33
24	09.08	18:35	10.08	16:15	5	21.7	2.31	6.44	53.99	1.96	3.73	0.6
25	10.08	8:00	12.08	10:00	8	50.0	2.05	5.99	68.61	3.39	2.54	0.13
26	11.08	16:10	14.08	18:55	8	74.8	1.93	6.12	68.44	2.51	1.66	0
27	12.08	10:00	13.08	19:05	3	33.1	1.72	6.5	48.04	1.67	1.67	0
28	14.08	13:00	14.08	18:55	2	5.9	1.77	6.35	43.69	3	3.91	0.5

ной 200 м за время  $T$  представляют собой одиночные гряды; коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  равны 1.8 и 0.6 с<sup>3</sup>/(м ч) соответственно. Формула (9) указывает только на тенденцию, разброс точек в этой зависимости велик, хотя в отдельных случаях эта тенденция проявляется очень четко (рис. 3.13 в [12]).

Сравнение данных о перемещении активных дюн\_1 для нижнего Терека с результатами измерения скорости смещения активных дюн на р. Нигер (табл. 1 в [11]) показывает их вполне удовлетворительно соответствие друг другу (рис. 8). Для совокупных данных среднее значение коэф-

фициента  $b = 1.9$  (при размерности  $C_T$  – м/ч) при величине достоверности  $R^2 = 0.82$ . Также вполне удовлетворительно (с величиной достоверности  $R^2 = 0.71$ ) этот массив данных аппроксимируется формулой Снисченко–Копалиани с коэффициентом 0.016 (когда размерность  $C_T$  – м/с).

### РАСХОД НАНОСОВ

Для оценки удельного расхода наносов  $q_{s3}$ , перемещающихся в форме гряд, применяется формула

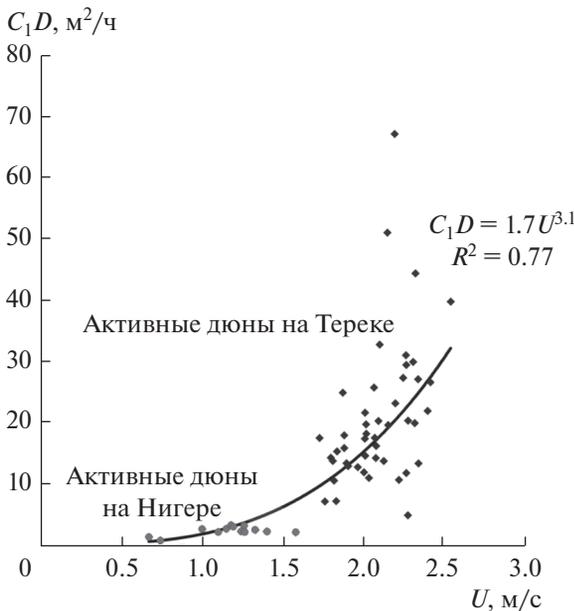


Рис. 8. Связь скорости перемещения активных дюн\_1 на нижнем Терекe и на Нигере со скоростью и глубиной потока.

$$q_{s3} = 0.5h_r C_r. \quad (10)$$

В этих расчетах удобно определять средние значения гидравлических характеристик потока, а также для морфометрии гряд — высоты и скорости перемещения — не для индивидуальных гряд, а для всех гряд на выделенном участке для заданного периода времени (табл. 3). Видно, что в период паводка июля–августа 1982 г. удельные расходы наносов, перемещающихся в форме гряд в плесовой ложине, в среднем составляют 7.4% расхода взвешенных руслообразующих наносов  $q_{s2}$ , а суммарные расходы руслообразующих наносов >70% расхода транзитных наносов. Эти цифры характеризуют условия в плесе для данного конкретного паводка. В среднем для всего русла нижнего Терекa доля руслообразующих наносов составляет 40% всех взвешенных наносов, и, конечно, она меньше, чем в плесовой ложине в паводок. Соотношение расходов руслообразующих наносов, по-разному передвигающихся, более устойчиво, так как они определяются одними и теми же гидравлическими характеристиками потока, и эти расходы связаны линейной зависимостью

$$q_{s3} = 0.074q_{s2} \quad (11)$$

при величине достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.73$ . Тогда при оценке годового стока взвешенных руслообразующих наносов в 7.3 млн т годовой сток наносов, перемещающихся в грядовой форме, составит 0.54 млн т, или  $\sim 0.3$  млн  $m^3$ . Так как крупность аллювия на нижнем Терекe невелика, а турбулентность и средняя скорость потока

значительны, большое количество руслообразующих наносов может перемещаться во взвеси. Так что оценка стока наносов в грядовой форме — 7.4% стока руслообразующих наносов во взвеси, вероятно, близка к нижней границе величин подобных соотношений на реках с песчаным аллювием. Так, для нижней Лены в створе Кюсюр это отношение близко к 100%, т.е. в виде гряд перемещается столько же руслообразующих наносов, что и во взвеси [15].

## ВЫВОДЫ

В низовьях Терекa в период даже небольших летних паводков с расходами воды 600–700  $m^3/c$  формируются активные гряды трех основных классов — рифелей, дюн\_1 и дюн\_2. Анализ их морфологии и динамики в целом подтверждает главные закономерности, полученные для гряд на других реках с песчаным аллювием. Данные по нижнему Тереку показывают, что эти закономерности применимы для более широкого диапазона гидравлических характеристик потока — скоростей, глубин, чисел Фруда.

Иерархия активных гряд в русле нижнего Терекa во время паводков редко бывает полной, трехчленной. Обычна двухчленная иерархия, или иерархия отсутствует вообще. Это создает дополнительные сложности при классификации гряд.

Морфология активных гряд существенно стохастична, может быть адекватно описана функциями распределения вероятностей характеристик гряд для некоторых диапазонов гидравлических характеристик потока. Функции распределения асимметричны, наиболее удовлетворительно применение логнормального и гамма-распределения. Первые два момента этих распределений обычно взаимосвязаны, так что распределения становятся однопараметрическими.

Средние арифметические или средние геометрические значения морфометрических характеристик гряд показывают устойчивые связи с гидравлическими характеристиками потока, в отдельных случаях (как для длины рифелей) эти эмпирические связи подтверждают теоретические расчеты (формулы (5), (6)).

Скорость перемещения активных дюн\_1 удовлетворительно описывается формулой Снисенко–Копалиани или, несколько лучше, ее модификацией — формулой (8).

Динамика гряд в иерархическом комплексе зависит от сложности этого комплекса: чем сложнее иерархия, тем медленнее перемещаются базовые для иерархии гряды.

Доля руслообразующих наносов, перемещающихся в форме гряд в низовьях Терекa, составляет  $\sim 7\%$  стока всех руслообразующих наносов, и

**Таблица 3.** Средние за сутки на участке длиной 160 м продольника 1 между створами 10 и 12 гидравлические характеристики потока (скорость течения  $U$  и глубина  $D$ ) и морфодинамические характеристики дюн\_1 (высота  $h$  и скорость перемещения  $C_r$ ) в период паводка 22 июля – 10 августа 1982 г. в плесовой ложине на нижнем Тереке; рассчитанные по формуле (10) удельные (на единицу ширины русла) расходы руслообразующих наносов, перемещающихся в форме гряд  $q_{s3}$ , сравниваются с измеренными расходами транзитных наносов  $q_{s1}$  и рассчитанными по формуле (1) и эпюре Рауза–Великанова расходами взвешенных руслообразующих наносов  $q_{s2}$

Дата	$U$ , м/с	$D$ , м	$h$ , м	$C_r$ , $10^5$ м/с	$q_{s3}$ , $м^2/с$	$q_{s1}$ , $м^2/с$	$q_{s2}$ , $м^2/с$	$(q_{s2} + q_{s3})/q_{s1}$ , %	$q_{s3}/q_{s2}$ , %
22.07.	2.2	4.5	2.9	115.1	0.00162	0.012	0.0143	134.5	11.4
23.07.	2.3	5.3	2.3	153.0	0.00173	0.028	0.0212	82.9	8.2
24.07.	2.2	5.5	2.1	127.7	0.00134	0.027	0.0162	64.6	8.3
25.07.	2.3	7.3	2.1	185.6	0.00194	0.076	0.0242	34.1	8.0
26.07.	2.3	4.7	1.7	146.2	0.00120	0.035	0.0187	57.5	6.4
27.07.	2.0	5.9	2.0	89.8	0.00088	0.026	0.0099	40.9	8.9
28.07.	1.9	6.2	1.6	75.5	0.00060	0.030	0.0094	33.4	6.3
29.07.	2.2	6.7	2.4	86.8	0.00110	0.030	0.0217	74.9	5.1
30.07.	2.1	6.6	2.4	85.9	0.00105	0.018	0.0145	86.8	7.2
31.07.	2.0	5.9	1.9	68.5	0.00065	0.013	0.0107	90.4	6.1
01.08.	2.1	6.2	2.0	60.8	0.00061	0.012	0.0127	108.8	4.8
02.08.	1.9	6.3	2.7	59.6	0.00078	0.035	0.0090	28.1	8.6
03.08.	2.0	6.2	2.3	73.7	0.00084	0.012	0.0104	89.6	8.1
04.08.	2.0	6.0	1.8	63.5	0.00056	0.016	0.0102	67.0	5.4
05.08.	2.3	6.3	2.6	132.5	0.00167	0.016	0.0237	156.1	7.0
06.08.	2.0	5.9	2.8	69.4	0.00098	0.011	0.0110	105.7	8.9
07.08.	1.8	6.3	1.6	45.8	0.00040	0.011	0.0068	67.2	5.8
09.08.	1.8	6.1	1.5	31.7	0.00024	0.010	0.0055	56.3	4.3
10.08.	1.8	6.2	2.5	68.0	0.00087	0.018	0.0064	39.7	13.5

это близко к нижнему пределу для подобных соотношений на реках с песчаным аллювием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И.* Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // *Метеорология и гидрология.* 1990. № 9. С. 100–105.
2. *Алексеевский Н.И., Сидорчук А.Ю.* Морфология и динамика рельефа русла в нижнем течении Терека // *Земельные и водные ресурсы.* М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. С. 87–95.
3. *Беркович К.М., Сидорчук А.Ю.* Динамика руслового рельефа нижнего Нигера // *Изв. АН СССР, Сер. геогр.* 1983. № 4. С. 66–72.
4. *Великанов М.А.* Динамика русловых потоков, Т. II. Наносы и русло. М.: Гостехиздат, 1955. 323 с.
5. *Горелиц О.В., Землянов И.В., Павловский А.Е., Иллаев Т.С.* Русловые деформации и перераспределение стока на устьевом участке р. Терек после катастрофического паводка 2002 г. // *Вод. ресурсы.* 2006. Т. 33. № 6. С. 677–685.
6. *Зайков Б.Д.* Средний сток и его распределение в году на территории СССР. Л; М.: Гидрометеиздат, 1946. 147 с.
7. *Лурье П.М.* Водные ресурсы и водный баланс Кавказа, СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 506 с.
8. *Михинов А.Е.* Неустойчивость донных волн в деформируемом русле // *Метеорология и гидрология.* 1983. № 11. С. 84–91.
9. *Рухин Л.Б.* Основы литологии. Л.: Гостоптехиздат, 1961. 778 с.
10. *Сидорчук А.Ю.* Морфология и динамика форм руслового рельефа на устьевом участке р. Терек // *Каспийское море. Гидрология устьев рек Терека и Сулака.* М.: Наука, 1993. С. 89–102.
11. *Сидорчук А.Ю.* Оценка стока влекомых наносов в речном русле с учетом данных об активной и пассивной динамике гряд // *Вод. ресурсы.* 2015. Т. 42. № 1. С. 31–44.
12. *Сидорчук А.Ю.* Структура рельефа речного русла. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 127 с.
13. *Снищенко Б.Ф., Копалиани З.Д.* О скорости движения гряд в реках и лабораторных условиях // *Тр. ГГИ.* 1978. Вып. 252. С. 30–37.
14. *Alekseevskiy N.* Movement of bed forms and sediment yield of rivers // *IAHS Publication.* 2004. № 288. P. 395–403.
15. *Alekseevskiy N., Sidorchuk A.* Total sediment yield of the Lena river, Eastern Siberia // *Hydrological and Geochemical processes in Large scale river basins.* Manaus, 1999. P. 26
16. *Best J.* The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № 4. P. 1–21.
17. *Vionnet C., Marti C., Amsler M., Rodriguez L.* The use of relative celerities of bedforms to compute sediment transport in the Parana' River // *IAHS Publ.* № 249. 1998. P. 399–406.