

УДК 556.535.6/537(551.435.11)

ОЦЕНКА СТОКА ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ В РЕЧНОМ РУСЛЕ С УЧЕТОМ ДАННЫХ ОБ АКТИВНОЙ И ПАССИВНОЙ ДИНАМИКЕ ГРЯД¹

© 2015 г. А. Ю. Сидорчук

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова**119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы**E-mail: aleksey.sidorchuk@geogr.msu.ru**Поступила в редакцию 15.05.2013 г.*

Перемещение гряд в речном русле может быть активным и пассивным. Активное перемещение осуществляется волнообразными структурами поля скоростей потока — поток управляет переформированием русла. В этот период гряды трехмерны, симметричны и движутся без однонаправленного изменения формы. Пассивное перемещение гряд происходит при упрощении структуры потока, когда она определяется только наличием грядового рельефа. Гряды становятся двухмерными, асимметричными, в ходе их перемещения гребни движутся быстрее ложбин и гряды перекашиваются. Для оценки расхода влекомых наносов при активном движении иерархической системы гряд необходимо суммировать расходы наносов, перемещаемых в виде гряд всех порядков, и учитывать транзит влекомых наносов в безгрядовой форме. При пассивном движении гряд достаточно рассчитать расход наносов, перемещаемых в виде гряд только одного порядка плюс транзитный расход влекомых наносов в безгрядовой форме. Теоретические исследования на основе подхода Экснера показывают возможность оценки транзитного расхода влекомых наносов в безгрядовой форме по данным о скоростях пассивного перемещения гряд.

Ключевые слова: активное перемещение гряд, пассивное перемещение гряд, речное русло, влекомые наносы, оценка транспорта наносов.

DOI: 10.7868/S0321059615010137

Оценка стока влекомых наносов — одна из главных задач при изучении динамики речного русла, так как в большинстве случаев именно влекомые наносы определяют переформирование русел рек. Один из признанных способов оценки стока влекомых наносов — анализ морфологии и динамики грядового рельефа дна речного русла [14–16, 22, 25]. Теоретические разработки для гряд впервые были проведены Ф. Экснером [23] и неоднократно уточнялись [6, 8, 9, 20, 27, 28]. Имеется значительное количество измерений динамики гряд в лабораторных лотках (более 700 ссылок на англоязычные статьи в поисковой системе ScienceDirect). Существенно меньше разработок по выявлению особенностей активной и пассивной динамики иерархии гряд [10, 20] как в области теории этого явления, так и по наблюдениям в руслах рек.

Активная и пассивная динамика гряд впервые была определена Н.С. Знаменской сначала для мезоформ, а затем и для всех типов гряд [10–12]. Гряды перемещаются активно, если их “...перемещение осуществляется при собственных им гидравлических условиях” [10, с. 83], “...смещение осуществляется путем движения частиц наносов” [12, с. 43]. Пассивное перемещение осуществляется “путем движения вторичных гряд, расположен-

ных на теле первичной гряды” [12, с. 43], которые образуются в результате действия потока с новыми гидравлическими характеристиками [10, с. 83]. При этом под гидравлическими условиями, свойственными грядам с активной динамикой, понимаются вихревые [6] или волнообразные [7, 20, 26] макротурбулентные структуры потока.

Если разница в характеристиках активного и пассивного движения гряд речного русла реально существует, то она должна приводить к существенным особенностям транспорта наносов в грядовой форме при том или ином типе перемещения. Соответственно, оценка стока влекомых наносов в речном русле по данным об активной и пассивной динамике гряд будет иметь свои особенности. Предмет настоящей статьи — выявление этих особенностей на базе наблюдений в реках и теоретического анализа перемещений гряд.

НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ О ТИПАХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРЯД В РЕЧНОМ РУСЛЕ

Наиболее полные данные о существенных изменениях морфологии и динамики гряд на дне речного русла получены на р. Нигер у Аджакуты, на участке ниже впадения р. Бенуэ [4, 17, 18]. Таким изменениям способствует гидрологический режим реки в тропиках, определяемый четко выраженными полугодовыми влажным и сухим се-

¹ Работа выполнена в рамках Программы Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-1010.2014.5).

зонами. Во время влажного сезона формируется мощное половодье. В мае на р. Нигер у Аджакуты начинается подъем уровня воды, который достигает максимума 36.7–40.1 м абс. в конце сентября. Пик половодья с расходом воды до 27 тыс. м³/с может продолжаться до конца октября, когда обычно начинается быстрое падение уровней воды. Период с января по апрель — время глубокой межени, когда уровни воды составляют 28.0–28.5 м, расход уменьшается до 800 м³/с.

На подъеме половодья на дне русла формируются трехмерные дюны, симметричные как в продольном, так и в поперечном направлении, с пологими (6°–8°) выпуклыми верховым и низовым откосами (рис. 1). На участке реки у Аджакуты их длина на пике половодья составляет 25–40, высота 1.5–2.0 м (табл. 1). Дюны покрыты трехмерными симметричными рифелями длиной 5–10, высотой 0.3–0.5 м. И дюны, и рифели перемещаются вниз по руслу без существенного изменения средних размеров и конфигурации, хотя индивидуальные гряды могут довольно сильно трансформироваться. Не прослеживается также влияние морфологии дюн на рифели — на верховых и низовых откосах дюн рифели имеют примерно одинаковые размеры.

На спаде половодья начинается трансформация дюн (рис. 2). Симметричные дюны становятся асимметричными за счет более быстрого смещения гребня, выполаживания верхового откоса и формирования крутого (до 10°–15°) низового откоса. Длина дюн увеличивается за счет слияния соседних дюн (табл. 1). Одновременно дюны становятся “двухмерными”, значительно увеличиваясь по ширине за счет слияния соседних дюн в поперечном направлении. Рифели слабо выражены в начале верховых откосов дюн, достигают максимальных размеров в пригребневой части и практически исчезают на низовых откосах дюн.

Во время межени дюны еще более удлиняются, уменьшается их высота (табл. 1). Верховые откосы становятся практически горизонтальными (0.2°–0.3°), низовые откосы приобретают крутизну, близкую к углам естественного откоса для песка в воде (20°–30°). Наряду с рифелями в пригребневой части асимметричных двухмерных дюн в плесах формируются вторичные трехмерные симметричные дюны, которые перемещаются вниз по руслу без существенного переформирования (рис. 3).

Сходные характеристики гряд наблюдаются в низовьях р. Терек во время прохождения летних паводков [3, 21].

Таким образом, наблюдения показывают отчетливые различия в морфологии гряд на разных фазах гидрологического режима и наличие двух главных типов динамики гряд. В период увеличения расходов воды, глубин и скоростей потока, а также в условиях установившегося потока происходит начальное формирование на плоском дне иерархии трехмерных симметричных гряд, кото-

рые перемещаются вниз по потоку без существенного изменения формы. Морфология и динамика гряд разных порядков во многом независимы. В период уменьшения расходов воды, глубин и скоростей потока происходит разрушение этой системы, по мере перемещения гряды преобразуются в двухмерные и все более асимметричные донные формы, а в иерархии наблюдается усиление взаимовлияния гряд разных уровней.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ГРЯД И ТРАНСПОРТА ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ

Рассмотрим случай, когда дно русла покрыто грядами и эти гряды образуют иерархический комплекс. Описание перемещения гряд k -го уровня проводится в системе натуральных ортогональных вертикальных и продольных координат $z^{(k)}; x^{(k)}$, привязанной к поверхности более крупных гряд $k + 1$ -го уровня. Самые крупные гряды иерархического комплекса рассматриваются в базовых координатах $z^{(k+n)}, x^{(k+n)}$, где продольная координата параллельна свободной поверхности потока, а вертикальная ей перпендикулярна.

Если следовать Ф. Экснеру [23], анализ динамики донных гряд каждого из уровней основан на уравнении баланса наносов и деформации. После осреднения трехмерного уравнения баланса наносов по глубине D и ширине W равнорасходной струи (по [5]) получим:

$$W \frac{\partial z_0}{\partial t} \pm q_{sb} \frac{\partial W}{\partial x} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} - \frac{\partial SWD}{\partial t} \pm q_{sb}. \quad (1)$$

Здесь имеются в виду объемный сток влекомых наносов $Q_s = \frac{Q_{s0}}{(1 - \varepsilon)}$ и объемная средняя по глубине

концентрация наносов $S = \frac{S_0}{(1 - \varepsilon)}$, где Q_{s0} и S_0 —

соответственно сток влекомых наносов и концентрация наносов, измеренные по их весу, ε — пористость донных отложений, q_{sb} — поперечный удельный объемный расход наносов, z_0 — вертикальная отметка дна, t — время.

Если отслеживать перемещение некоторого малого участка дна с неизменной вертикальной отметкой z_0 , то полная производная по времени t при таком перемещении будет равна нулю [8, стр. 227]:

$$\frac{dz_0}{dt} = \frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{\partial z_0}{\partial x} C_z = 0. \quad (2)$$

Здесь C_z — скорость продольного перемещения такого участка. Изменение расхода влекомых наносов по длине x запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_s}{\partial x} &= \frac{\partial WC_z z_0}{\partial x} - z_0 \frac{\partial WC_z}{\partial x} \pm \\ &\pm q_{sb} \left(1 + \frac{\partial W}{\partial x} \right) - \frac{\partial SWD}{\partial t} = \frac{\partial WC_z z_0}{\partial x} - p_1(x, t). \end{aligned} \quad (3)$$

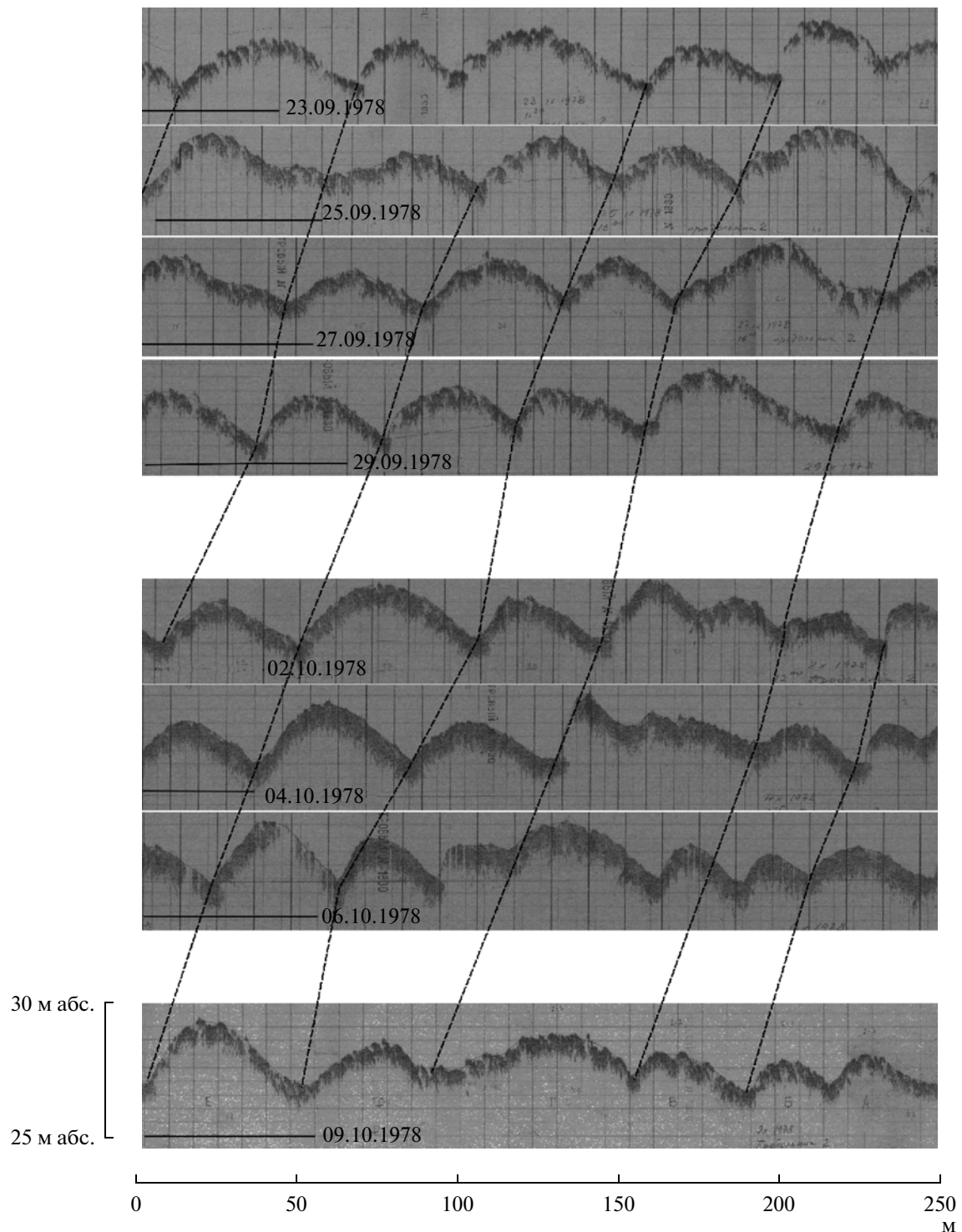


Рис. 1. Морфология и динамика комплекса активных гряд (рифели на дюнах) во время половодья 1978 г. на р. Нигер у Аджакуты, продольник 2, правый борт осередка.

Расход влекомых наносов на участке дна с отметкой z_0 может быть получен интегрированием (3) по длине потока:

$$Q_s = WC_z z_0 - \int p_1(x, t) dx + f(t). \quad (4)$$

Значение неопределенной функции $f(t)$ находится при условии $z_0 = 0$, т. е. она равна расходу наносов (с учетом трехмерных эффектов) на наиболее низком участке дна — в подвалье гряды. Иногда полагается, что на таком участке расход

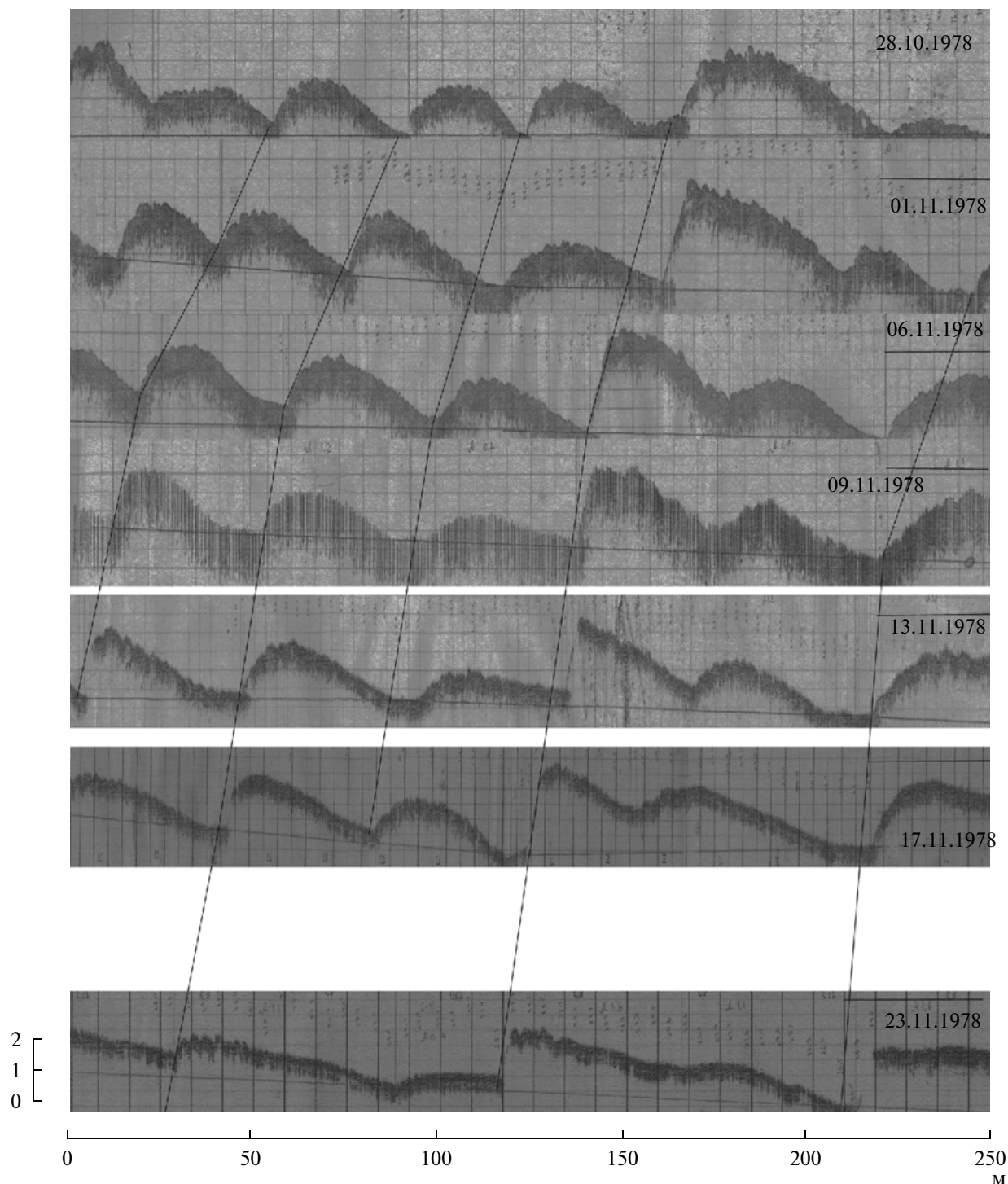


Рис. 2. Морфология и динамика комплекса гряд (активные рифели на пассивных дюнах) во время спада половодья 1978 г. на р. Нигер у Аджакуты, продольник 2, правый борт осередка.

влекомых наносов и, следовательно, функция $f(t)$ равны нулю [8, стр. 227]. Это означает, что при грядовом движении наносов невозможен их транзит в подвальях гряд. Однако такое предположение не является общим и может реализоваться лишь в частных случаях, например при движе-

нии гряд с крутыми низовыми откосами. В большинстве исследований по расчету стока влекомых наносов величина функции $f(t)$ остается неопределенной [24]. В общем случае транзит наносов в подвальях гряд имеется [13, 28] и значение функции $f(t)$ соответствует транзитному рас-

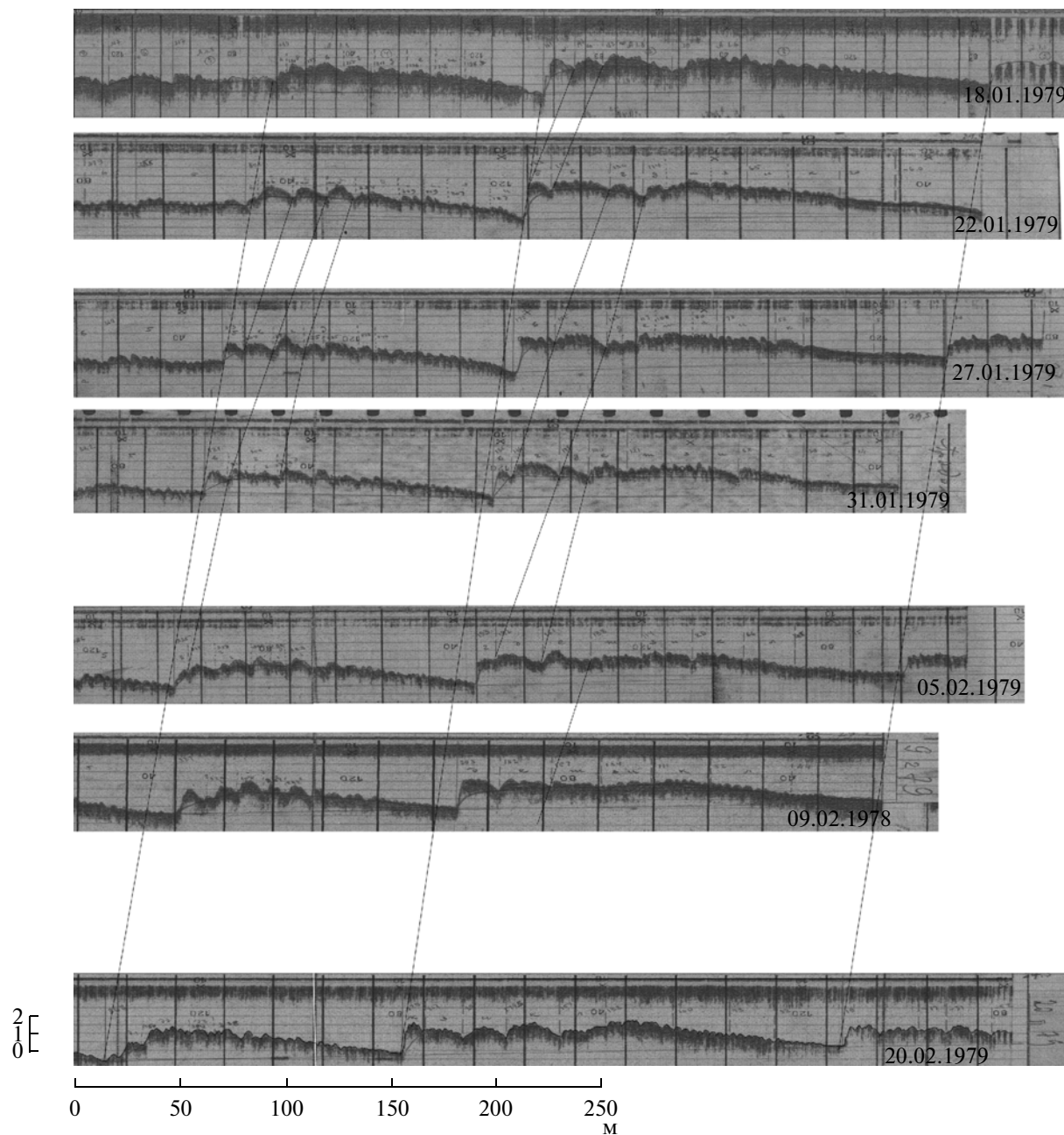


Рис. 3. Морфология и динамика комплекса гряд (активные дюны с рифелями на пассивных дюнах) во время межени 1979 г. на р. Нигер у Аджакуты, продольник 1, правобережная плесовая ложина.

ходу влекомых наносов в подвалье гряды $Q_{тр}$ с учетом трехмерных эффектов, выражаемых функцией $p_{10}(x,t) = \left[\pm q_{sb} \left(1 + \frac{\partial W}{\partial x} \right) - \frac{\partial SWD}{\partial t} \right]_0$. Тогда местный удельный расход влекомых наносов выразится формулой

$$\begin{aligned} q_s &= C_z z_0 - \frac{1}{W} \int [p_1(x,t) - p_{10}(x,t)] dx + q_{тр} = \\ &= C_z z_0 - \frac{1}{W} \int p_{01}(x,t) dx + q_{тр}. \end{aligned} \quad (5)$$

Средний удельный расход влекомых наносов при перемещении по дну гряды на ее полную длину L может быть рассчитан по формуле

$$\bar{q}_s = \frac{1}{L} \int_0^L \left[C_z z_0 - \frac{1}{W} \int p_{01}(x,t) dx \right] dx + q_{тр}. \quad (6)$$

Формулу (6) можно записать в традиционном виде через произведение высоты гряды h_r на скорость ее перемещения C_r :

$$\bar{q}_s = \sigma^* C_r h_r + q_{тр}. \quad (7)$$

Таблица 1. Морфология и динамика иерархических комплексов гряд в руслах рек с песчаным аллювиом (осредненные по длине донных форм характеристики: U – скорость потока, D – глубина, h_r – высота рифелей, L_r – шаг рифелей, C_r – скорость перемещения рифелей, h_d – высота дюн, L_d – шаг дюн, C_d – скорость перемещения дюн, d – крупность донных грунтов; типы комплексов донных форм: 1 – рифели на пассивных дюнах, 2 – рифели на плоском дне, 3 – активные дюны с рифелями, 4 – пассивные дюны с рифелями, 5 – пассивные дюны с активными дюнами и рифелями)

Река	Местоположение продольника	Период наблюдений	U , м/с	D , м	h_r , м	L_r , м	C_r , м/с $\times 10^5$	h_d , м	L_d , м	C_d , м/с $\times 10^5$	D , мм	Тип гряд
Активное перемещение рифелей												
Обь	Фоминское – устье Аноя	07.07.1985	0.99	2.7	0.16	3.2	47.8				0.7	1
	То же	11.07.1985	0.96	3.7	0.15	2.4	36.4				0.7	1
Лена	»	13.07.1985	1.04	5.3	0.12	2.2	17.8				2.0	1
	»	24.07.1985	0.90	1.9	0.22	3.4	39.4				0.7	1
	»	28.07.1985	1.09	3.9	0.21	3.5	51.4				0.7	1
	Мохооголох	05.08.1986	0.81	2.2	0.18	1.9	43.3				0.25	2
	»	05.08.1986	1.00	3.7		2.5	40.3				0.25	2
Вычегда	»	06.08.1986	0.85	2.9	0.15	1.8	31.4				0.25	2
	»	06.08.1986	1.49	5.3		3.0	36.7				0.25	2
	Староостровский перекаг	15.06–03.07.1996	0.72	2.2	0.1	3.1	12.2	0.21	13.3	4.42	0.45	1
	То же	14.06–01.07.1996	0.77	3	0.12	4.1	15.3	0.4	23.8	4.08	0.45	1
	»	22.06.1996	0.77	2.6	0.18	3.9	24.7				0.45	1
	Нижне-Шешуровский перекаг	19–27.08.1997	0.95	1.2	0.16	4.1	18.1				0.8	1
	То же	19–27.08.1997	1.2	1.3	0.13	3.5	31.7				0.45	1
Активное перемещение дюн												
Нигер	Аджакута, прод. 0	09–13.02.1979	0.67	4.14				0.9	21.9	8.2	0.7	5
	Аджакута, прод. 1	23.09–09.10.1978	1.58	9.6	0.50	7.0		1.22	46.1	5.7	0.75	3
	То же	18.01.1978– 20.02.1979	0.74	3.5	0.15	3.5		0.64	16	5.2	0.75	3
	Аджакута, прод. 2	23–25.09.1978	1.1	9.2	0.45	5.30		1.65	47.00	6.19	0.77	3
	То же	25–27.09.1978	1.19	9.35	0.48	5.70		1.60	48.00	8.80	0.77	3
	»	27–29.09.1978	1.33	9.5	0.48	5.70		1.55	45.50	6.89	0.77	3
	»	29.09–02.10.1978	1.4	9.35	0.45	5.95		1.50	44.00	6.37	0.77	3
	»	02–04.10.1978	1.26	9.15	0.40	5.60		1.55	45.00	6.25	0.77	3
	»	04–06.10.1978	1.18	9.1	0.40	2.70		1.50	46.00	9.55	0.77	3
	»	06–09.10.1978	1.15	8.8	0.43	2.55		1.40	44.00	8.02	0.77	3
	Аджакута, прод. 3	27.09–09.10.1978	1.24	6.8	0.4	5.75		1.06	34	8.7	0.6	3
	Аджакута, прод. 4	29.09–09.10.1978	1.26	10.4	0.49	5.83		1	33.5	8.1	0.6	3
	То же	09–28.10.1978	1	9.5	0.6	5.75		1.3	37.5	7.3	0.6	3

Таблица 1. Окончание

Река	Местоположение продольника	Период наблюдений	U , м/с	D , м	h_r , м	L_r , м	C_r , м/с $\times 10^5$	h_d , м	L_d , м	C_d , м/с $\times 10^5$	D , мм	Тип гряд
Пассивное перемещение дюн												
Нигер	Аджакута, прод. 0	09–13.02.1979	0.67	5.25				1.47	101.2	3.62	0.7	5
	Аджакута, прод. 1	06–25.11.1978	0.88	6.1	0.20	4.4		1.14	37.3	3.14	0.75	4
	То же	18.01.1978– 20.02.1979	0.74	3.5	0.15	3.5		1.10	101.0	3.7	0.75	4
	Аджакута, прод. 2	28.10–01.11.1978	1.05	7.05	0.37	5.50		1.65	41.50	3.99	0.77	4
	То же	01–06.11.1978	1.03	6.7	0.33	5.35		1.80	39.50	3.43	0.77	4
	»	06–09.11.1978	1.01	6.25	0.33	4.70		1.65	40.00	2.47	0.77	4
	»	09–13.11.1978	0.91	5.6	0.31	3.80		1.45	40.50	1.91	0.77	4
	»	17–23.11.1978	0.69	2.23	0.23	2.85		1.10	44.00	1.68	0.77	4
	»	27.01–09.02.1979	0.61	2.1	0.20	2.9		0.9	191.0	1.02	0.77	4
	Аджакута, прод. 3	28.10–13.11.1978	0.9	4.4	0.23	3.7		1.09	42	2.6	0.6	4
Днестр*	То же	15–28.11.1978	0.65	2.14	0.16	4.1		0.76	66.5	2.3	0.6	4
	Аджакута, прод. 4	28.10–06.11.1978	0.94	8.75	0.56	5.45		1.76	44	3	0.6	4
	То же	06–25.11.1978	0.81	6.6	0.26	4.6		1.44	43.3	1.14	0.6	4
	»	27.01–21.02.1979	0.52	3.53	0.15	2.8		0.87	93.3	0.97	0.6	4
	Аджакута, прод. 5	06–25.11.1978	0.99	7.06	0.17	3.6		1.55	41.5	1.4	0.55	4
	Аджакута, прод. 6	27.01–15.02.1979	0.88	5.3				0.85	28.5	0.97	0.5	5
	Перекаг Пугачены	01.06.1987	0.52	1.2				0.4	17.4	0.81	0.36	4
	То же	05.06.1987	0.55	1.2				0.4	17.4	1.16	0.36	4
	Перекаг Варница	02.07.1987	0.47	2.5				0.5	12.	1.62	0.36	4
	То же	10.07.1987	0.45	2.1				0.5	12.	1.27	0.36	4
Обь**	Ниже Новосибирской ГЭС	07.08.1987	0.92	4.4	0.2	9.3		0.6	37	6.44	0.39	4
	То же	07.08.1987	0.93	4.2	0.2	8.0		0.6	47	6.63	0.9	4
	»	07.08.1987	0.90	3.6	0.25	6.5		0.9	32	7.7	0.47	4
	»	07.08.1987	0.82	3.65				0.4	36	7.8	0.32	4
Вычегда	Староостровский перекаг	12.06–03.07.1996	0.72	2.9				0.25	11	5.03	0.45	4
	То же	18–29.06.1996	0.84	5.7				0.34	12.3	4.72	0.45	4

* Данные Л.А. Турыкина.

** Данные Н.И. Алексеевского.

Здесь σ^* — динамический коэффициент формы гряды, который учитывает изменение формы гряды при ее движении при переменных гидравлических характеристиках потока:

$$\sigma^* = \frac{\int_0^L \left[C_z z_0 - \frac{1}{W} \int p_{01}(x, t) dx \right] dx}{C_r h_r L_r}. \quad (8)$$

Возможна иная форма записи связи расхода наносов и характеристик гряд. Скорость перемещения поверхности гряды выражается с помощью (1) и (2) через градиент расхода наносов по отметкам дна и некоторую функцию p , которая описывает изменение гидравлических характеристик потока во времени и пространстве:

$$C_z = \left[\frac{\partial Q_s}{\partial x} \pm q_{sb} \left(1 + \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial S W D}{\partial t} \right] \frac{\partial x}{W \partial z_0} = \frac{\partial Q_s}{W \partial z_0} + p(x, t). \quad (9)$$

Тогда

$$\bar{q}_s = \sigma^* h_r \left(\frac{\partial Q_s}{W \partial z_0} + p(x, t) \right) + q_{тр}. \quad (10)$$

Для расхода влекомых наносов в безгрядовой форме будем употреблять индекс (0), для расходов наносов, перемещаемых в грядовой форме, — индекс уровня этих гряд в иерархии. В этих обозначениях формула (10) среднего расхода влекомых наносов для гряд уровня (1) запишется в виде:

$$\bar{q}_s^{(1)} = \sigma^{(1)} h_r^{(1)} \left(\frac{\partial Q_s^{(0)}}{W^{(1)} \partial z_0^{(1)}} + p^{(1)}(x, t) \right) + q_{тр}^{(0)}. \quad (11)$$

Гряды уровня (1) и транзитные наносы перемещаются по поверхности гряд уровня (2). Можно отвлечься от процессов транспорта наносов в пределах гряд уровня (1) и считать их элементарными дискретными образованиями (квазичастицами). Аналогом формулы (9) будет выражение

$$C_r^{(2)} = \frac{\partial Q_s^{(1)}}{W^{(2)} \partial z_0^{(2)}} + p^{(2)}(x, t). \quad (12)$$

Следует иметь в виду несовпадение натуральных систем координат, в которых перемещаются гряды уровня (1) и уровня (2). Зная скорость смещения гряд уровня (2), можно рассчитать средний удельный расход влекомых наносов, которые перемещаются в виде этих гряд с учетом транзита наносов:

$$\bar{q}_s^{(2)} = \sigma^{(2)} h_r^{(2)} \left(\frac{\partial Q_s^{(1)}}{W^{(2)} \partial z_0^{(2)}} + p^{(2)}(t) \right) + q_{тр}^{(1)}. \quad (13)$$

Изложенную выше процедуру можно применять последовательно для всех гряд иерархического комплекса, учитывая необходимость осреднения гидравлических характеристик потока по длине все более крупных гряд.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРЯД РАЗНОГО ТИПА

Формулы (11)–(13) запишутся по-разному для гряд с разным типом динамики. Средняя скорость течения внутри некоторой полосы потока с переменными шириной и глубиной, но с постоянным расходом воды Q , определяется по формуле

$$U = \frac{Q}{WD}. \quad (14)$$

Расход влекомых наносов Q_s и их удельный расход q_s можно представить без особой детализации [8, с. 258] в виде степенной функции от скорости и глубины потока:

$$Q_s^{(0)} = q_s^{(0)} W = k_s U^n D^m W. \quad (15)$$

Коэффициенты в (15) изменяются от объекта к объекту, при этом $m < n$ и часто $m = 0$. С применением формул (14) и (15) формула скорости смещения поверхности гряд уровня (1) приобретает вид

$$\begin{aligned} C_z^{(1)} &= \frac{\partial Q_s^{(0)}}{W \partial z_0} + p(x, t) = \\ &= k_s \frac{Q^n}{W} \frac{\partial (W^{1-n} D^{m-n})}{\partial z_0 \partial D} \partial D + p(x, t) = \\ &= -k_s \frac{Q^n}{W} f_D \frac{\partial (W^{1-n} D^{m-n})}{\partial D} + p(x, t). \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь f_D — косинус угла между направлениями продольной координаты уровня (1) и базовой продольной координаты в точке измерения $C_z^{(1)}$. Эта поправка возникает из-за несовпадения систем натуральных координат, в которых описываются гряды разных иерархических уровней, и базовой системы координат, в которой измеряется глубина потока.

Если гряда движется без однонаправленного изменения формы (рис. 1), скорость перемещения всех точек на ее поверхности одинакова и равна скорости перемещения всей гряды: $C_r : C_z = C_r = \text{const}$:

$$C_r^{(1)} = p(x, t) - \frac{q_s}{D} f_D (m - n) - \frac{q_s}{W} f_D (1 - n) \frac{\partial W}{\partial D}. \quad (17)$$

Это соотношение реализуется в потоке с переменной шириной равнорасходных струй (во времени и/или в пространстве). Так как вид функций $p(x, t)$ и $\frac{\partial W}{\partial D}$ в общем случае неизвестен, то провести расчет скорости смещения не меняющих форму гряд на основании подхода Экснера в настоящее время невозможно.

Для гряд второго порядка

$$C_r^{(2)} = \frac{\partial \left[\sigma^{(1)} h_r^{(1)} \left(\frac{\partial Q_s^{(0)}}{\partial z_0^{(1)}} + W^{(1)} p^{(1)}(x, t) \right) + Q_{\text{тр}}^{(0)} \right]}{W^{(2)} \partial z_0^{(2)}} + p^{(2)}(x, t). \quad (18)$$

Так как скорость смещения первого порядка постоянна по длине и высота этих гряд часто не меняется, то первый дифференциал равен нулю и скорость смещения гряд второго порядка определяется трехмерными характеристиками динамики потока и транзитом наносов:

$$C_r^{(2)} = \frac{\partial Q_{\text{тр}}^{(0)}}{W^{(2)} \partial z_0^{(2)}} + p^{(2)}(x, t). \quad (19)$$

Если поток над грядами – плоский и ширина равнорасходных струй постоянна и в пространстве, и во времени ($\frac{\partial W}{\partial D} = \frac{\partial W}{\partial t} = 0$), тогда удельный расход воды $q = Q/W$ не меняется вдоль гряды и скорость потока меняется только с его глубиной:

$$U = \frac{q}{D}. \quad (20)$$

Функция $p(x, t)$ определяется в основном поперечным расходом наносов:

$$p(x, t) = \pm \frac{1}{L} \int q_{sb} \frac{\partial x}{W \partial z_0} dx \quad (21)$$

и для плоского потока (и плоских двухмерных гряд) ее можно полагать пренебрежимо малой. Тогда

$$C_z^{(1)} = (n - m) f_D \frac{q_s^{(0)}}{D}. \quad (22)$$

Такая скорость перемещения точек на поверхности гряды в плоском потоке при $n > m$ не может быть постоянной по длине, она увеличивается с уменьшением глубины, и гряда перекашивается за счет более быстрого перемещения пригребневых участков (рис. 2, 3). Формула расхода наносов для гряд первого порядка в плоском потоке записывается следующим образом:

$$\overline{q_s^{(1)}} = \sigma^{(1)} h^{(1)} (n - m) f_D \frac{q_s^{(0)}}{D} + q_{\text{тр}}^{(0)}. \quad (23)$$

Аналогично скорости смещения гряд уровня (2) соответствующие расходы влекомых наносов могут быть рассчитаны с помощью выражений:

$$C_z^{(2)} = \frac{\partial q_s^{(1)}}{\partial z_0^{(2)}} = (n - m) f_D^{(2)} \left[\sigma^{(1)} h^{(1)} (n - m) f_D \frac{q_s^{(0)}}{D^2} + \frac{q_{\text{тр}}^{(0)}}{D} \right], \quad (24)$$

$$\overline{q_s^{(2)}} = \sigma^{(2)} h^{(2)} (n - m) f_D \frac{\sigma^{(1)} h^{(1)} (n - m) f_D \frac{q_s^{(0)}}{D} + q_{\text{тр}}^{(0)}}{D} + \left(\sigma^{(1)} h^{(1)} (n - m) f_D \frac{q_s^{(0)}}{D} + q_{\text{тр}}^{(0)} \right). \quad (25)$$

Эти вычисления могут быть выполнены и для более крупных гряд [19].

Таким образом, теоретический анализ перемещения гряд и его связи с расходом влекомых наносов уточняет характеристики двух типов движения гряд. Гряды перемещаются без изменения формы (все участки поверхности гряды движутся с одинаковыми скоростями) только при наличии некоторой трехмерной структуры потока, которая поддерживает такой тип движения. Скорость смещения гряды определяется в основном перемещением этой структуры потока. Для гряд первого порядка она имеет следующий вид:

$$\left(\pm q_{sb} \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial SWD}{\partial t} \pm q_{sb} \right) \frac{\partial x}{W \partial z_0} - \frac{q_s}{W} f_D (1 - n) \frac{\partial W}{\partial D}, \quad (26)$$

и для ее описания в настоящее время недостаточно данных. Можно только предполагать, что это – некая волновая или вихревая структура, вызывающая образование гряд, согласно теории начальной неустойчивости [7, 20, 26].

Когда характер изменения скоростей упрощается за счет ослабления или полного исчезновения волновой структуры потока, описываемой формулой (26), распределение скоростей в потоке можно рассчитать по формуле (20). В этом случае форма гряды при перемещении начинает изменяться из-за различий в скоростях движения разных участков поверхности гряды. В соответствии с теорией Экснера, точка гребня гряды смещается быстрее точек ложбин и гряда становится по мере движения все более и более асимметричной. Средняя скорость смещения гряды определяется в основном транспортом влекомых наносов.

Воспользуемся терминами Н.С. Знаменской “активное и пассивное перемещение гряд”, но уточним определение этих типов движения гряд исходя из проведенного анализа.

1) Гряды перемещаются активно (для краткости будем называть их “активные” гряды), если их движение определяется перемещением волновых структур потока, формирующих такие гряды. Активные гряды перемещаются без направленного изменения формы, так как эта форма поддерживается структурой потока. Такая стадия взаимодействия потока и русла обычно называется “поток управляет руслом”. Для активных гряд важны трехмерные эффекты, связанные с поперечным переносом наносов, а также изменения структуры потока в пространстве и во времени. Формирование расхода влекомых наносов проис-

ходит вследствие деформаций дна русла при движении активных гряд.

2) Пассивное перемещение гряд (перемещение “пассивных” гряд) осуществляется за счет транспорта наносов — движения транзитных наносов и более мелких активных и/или пассивных гряд по поверхности более крупных гряд. Пассивные гряды — обычны в плоском двухмерном потоке, где отсутствуют волнообразные структуры потока, описываемые (26). Пассивные гряды сами формируют структуру потока, движутся с изменением формы: верховые откосы гряд становятся более пологими, а низовые — крутыми, гряды перекашиваются. Эта стадия взаимодействия потока и русла обычно называется “русло управляет потоком”.

И активные, и пассивные гряды могут иметь иерархическую структуру, а могут быть представлены только одним порядком гряд. Они также могут формировать смешанную иерархию, когда более мелкие активные гряды перемещаются по поверхности более крупных пассивных гряд. Оценка величины расхода влекомых наносов будет разной для активных и пассивных гряд. В случае активных гряд транспорт наносов формируется за счет независимого движения всех гряд иерархического комплекса и транзитных наносов. Общий расход влекомых наносов рассчитывается как сумма частных расходов влекомых наносов, оцениваемых по морфологии и динамике активных гряд из комплекса k -го порядка:

$$\begin{aligned} q_s^{(0)} &= \sigma^* C_r^{(1)} h_r^{(1)} + q_{тр}^{(0)} = \\ &= \sigma^* C_r^{(1)} h_r^{(1)} + \sigma^* C_r^{(2)} h_r^{(2)} + q_{тр}^{(1)} = \\ &= \sigma^* C_r^{(1)} h_r^{(1)} + \sigma^* C_r^{(2)} h_r^{(2)} + \dots + \sigma^* C_r^{(k)} h_r^{(k)} + q_{тр}^{(k-1)}. \end{aligned} \quad (27)$$

Формула (27) — основа оценки стока влекомых наносов в методике Н.И. Алексеевского [1, 2]. Использование всего иерархического комплекса перемещающихся гряд минимизирует ошибку оценки расхода влекомых наносов до величины $q_{тр}^{(k-1)}$, которую необходимо определять дополнительно.

В случае пассивных гряд транспорт наносов определяет движение гряд. При расчете общего расхода влекомых наносов по морфологии и динамике иерархического комплекса пассивных гряд нет необходимости складывать все частные расходы влекомых наносов. Достаточно оценить расход влекомых наносов по морфологии и динамике пассивных гряд любого порядка с учетом возможного транзита наносов за счет движения всех более мелких донных форм и частиц наносов в подвальях этих гряд.

$$\begin{aligned} q_s^{(k)} &= \sigma^* C_r^{(k)} h_r^{(k)} + q_{тр}^{(k-1)} = q_s^{(k-1)} = \\ &= \sigma^* C_r^{(k-1)} h_r^{(k-1)} + q_{тр}^{(k-2)} = \\ &= \dots q_s^{(1)} = \sigma^* C_r^{(1)} h_r^{(1)} + q_{тр}^{(0)} = q_s^{(0)}. \end{aligned} \quad (28)$$

Здесь также расход влекомых наносов оценивается с точностью до неизвестной величины $q_{тр}^{(p)}$. Однако в случае пассивных гряд высока вероятность того, что транзит наносов полностью прекращается в подвалье гряды некоторого $p + 1$ -го порядка, тогда ошибка формулы (28) определяется только поперечным перемещением наносов. Формула (28) применима и для случая движения активных гряд первого порядка по комплексу более крупных пассивных гряд.

Транспорт влекомых наносов при активном и пассивном движении гряд формируется в разных гидравлических условиях. Наличие активных симметричных гряд, перемещающихся без изменения формы, означает также и наличие усложненной структуры потока. Дополнительная изменчивость поля скоростей приводит к активным деформациям дна русла и усложнению характеристик транспорта влекомых наносов. Наличие пассивных асимметричных гряд, перекашивающихся в ходе перемещения, означает редуцирование и исчезновение усложненной структуры потока. Соответственно, упрощается формирование расхода влекомых наносов. Отсюда следует, что при одинаковых осредненных характеристиках потока расход влекомых наносов будет разным при наличии активных или пассивных гряд. Различными будут и эмпирические связи скорости перемещения гряд и расхода влекомых наносов с осредненными гидравлическими характеристиками потока.

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ АСИММЕТРИЧНЫХ ПАССИВНЫХ ГРЯД

Итак, пассивные асимметричные гряды двухмерны и существуют в условиях плоского потока. Во всяком случае для p . Нигер у Аджакуты это условие выполняется с достаточной для практических расчетов точностью — разница измеренных и вычисленных по формуле (14) скоростей потока составляет 4–8% на спаде половодья и 6–9% во время межени. Гряды перемещаются за счет движения влекомых наносов, перекашиваются и вылаживаются (рис. 2, 3). В этих условиях возможно теоретическое решение скоростей их смещения по формулам вида (22)–(25).

Скорости смещения пассивных асимметричных дюн были измерены в условиях межени на Нигере, Оби, Днестре и Вычегде (табл. 1), т.е. на равнинных реках, русла которых сложены средним и крупным песком. Во всех случаях по пассивным дюнам перемещались активные рифели, так что общий расход влекомых наносов определялся морфологией и динамикой рифелей и транзитным транспортом влекомых наносов в безгрядовой форме:

$$q_s^{(1)} = \sigma^* C_r^{(1)} h_r^{(1)} + q_{тр}^{(0)} = q_s^{(0)}. \quad (29)$$

Тогда

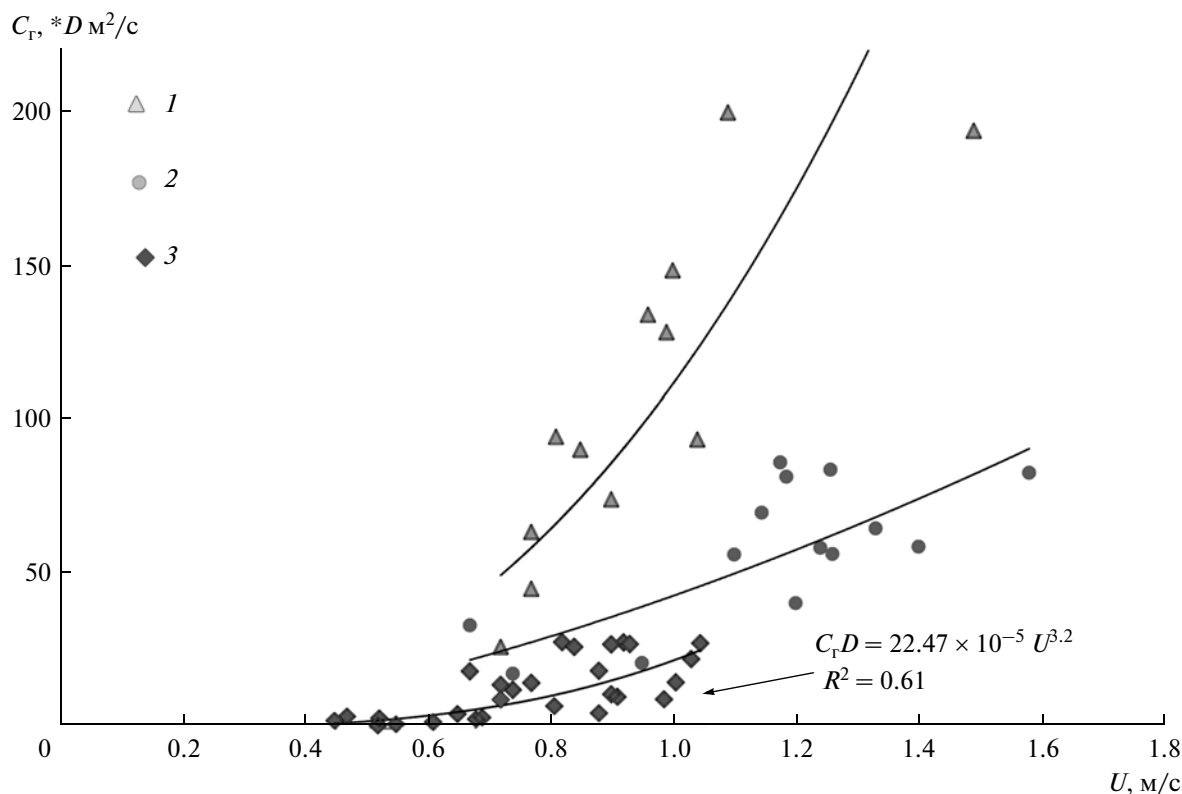


Рис. 4. Зависимости скоростей перемещения гряд от гидравлических характеристик потока. 1 – активные рифели, 2 – активные дюны, 3 – пассивные дюны.

$$C_r^{(2)} = \frac{\overline{\partial q_s^{(0)}}}{\partial z_0^{(2)}} \quad (30)$$

и с учетом (15)

$$C_r^{(2)} = (n - m) f_D \frac{q_s^{(0)}}{D}. \quad (31)$$

Скорости перемещения пассивных дюн (табл. 1) описываются эмпирической формулой (рис. 4):

$$C_r^{(2)} = 22.5 \times 10^{-5} \left(\frac{U^{3.2}}{D} \right). \quad (32)$$

Тогда из формулы (31) при $f_D = 1$ и $m = 0$ приходим к формуле для расчета расхода влекомых наносов (m^2/c):

$$\overline{q_s^{(0)}} = 7 \times 10^{-5} U^{3.2}. \quad (33)$$

Таким образом, наблюдения за перемещением пассивных дюн с активными рифелями и применение подхода Экснера дают возможность получить в первом приближении коэффициенты в эмпирической формуле для расчета общего расхода влекомых наносов и оценить величину их транзита (для периода с наличием в речном русле пассивных дюн).

Для пяти продольников удалось установить полный расход влекомых наносов по аккумуляции крутых гряд в подвальях, где не было транзи-

та наносов (табл. 2). В целом имеется соответствие измеренных и рассчитанных по формуле (33) величин, среднеквадратическая относительная ошибка составляет 30%.

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ АКТИВНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ГРЯД

Рифели в реках обычно – активные симметричные гряды, даже во время межени. Для анализа перемещения рифелей необходимы специальные учащенные промеры с высокой точностью привязки положения промерного судна. Повторные промеры нужно проводить с интервалом 30–60 мин на протяжении 8–12 ч, так как морфология индивидуальных рифелей быстро меняется. Подобные детальные натурные измерения показывают, что средние значения морфометрических параметров рифелей (длина L_R , высота h_R , асимметрия L_H/L_B и крутизна h_R/L_R) и их дисперсии мало изменяются во времени при неизменных гидравлических характеристиках. В то же время индивидуальная морфология конкретных рифелей значительно изменяется под влиянием случайных факторов. Коэффициенты корреляции пар рядов морфологических параметров одних и тех же рифелей в разные моменты времени быстро уменьшаются с увеличением продолжительности отрезка времени, разделяющего эти

ряды. По наблюдениям на верхней Оби, для промежутка времени 2 ч (~1.5 периода рифелей τ) коэффициенты корреляции для высот и длин рифелей уменьшились до 0.4, а для крутизны и асимметрии — до 0.3. Для периода 6 ч (4 τ) коэффициенты корреляции для рядов крутизны и асимметрии переходят через ноль, а для промежутка 8–9 ч (6 τ) через ноль переходят и коэффициенты для рядов длин и высот. Иными словами, за такой промежуток времени происходит полная трансформация конкретных рифелей при сохранении средних геометрических характеристик всего комплекса донных форм.

Эмпирические данные по рекам Обь, Лена и Вычегда подтверждают нецелесообразность совместного использования данных наблюдений за движением гряд разных типов (рис. 4) и необходимость учета дополнительных членов в формуле для расчета скорости смещения активных гряд. Если использовать для расчета расхода влекомых наносов формулу (33), то для скорости перемещения активных рифелей из (17) следует, что

$$C_r^{(1)} = 22.5 \times 10^{-5} \frac{U^{3.2}}{D} - a(x, t) U^{3.2} + p(x, t). \quad (34)$$

Измерения показывают (табл. 1), что $a(x, t) = \frac{k_s}{Wf_D} (1 - n) \frac{\partial W}{\partial D} = -19.7 \times 10^{-5}$; $p(x, t) = 12.3 \times 10^{-5}$. Фазы изменения ширины равнорасходных струй и изменения глубины над зарождающимися рифелями совпадают. По мере увеличения высоты гребней рифелей в областях расширения равнорасходных струй градиенты скоростей потока увеличиваются, т.е. волнообразная структура скоростей потока над рифелями устойчива.

Прямые наблюдения за перемещением симметричных активных дюн были проведены на р. Нигер во время половодья и устойчивой межени (табл. 1). Так как по активным дюнам переме-

щались активные рифели, скорость смещения дюн рассчитывалась по формуле (19). Применяя формулу (33), приходим к выражению, сходному по структуре с формулой (34):

$$C_r^{(2)} = 22.5 \times 10^{-5} \frac{U^{3.2}}{D} - a(x, t) U^{3.2} + p(x, t). \quad (35)$$

Однако для активных дюн на Нигере $a(x, t) = \frac{k_s}{Wf_D} (1 - n) \frac{\partial W}{\partial D} = 1.8 \times 10^{-5}$; $p(x, t) = 6.1 \times 10^{-5}$. Это означает, что изменение ширины равнорасходных струй происходит в противофазе с изменением глубины над зарождающимися дюнами, что подтверждается измерениями поля скоростей над симметричными дюнами на Нигере [20]. По мере увеличения высоты гребней дюн в областях расширения равнорасходных струй градиенты скоростей потока уменьшаются, а в дальнейшем меняют знак. Волнообразная структура поля скоростей потока вырождается, и дюны переходят в пассивную стадию.

Теоретические исследования морфологии и динамики активных гряд и оценка по ним стока влекомых наносов — дело будущего. Коэффициенты в формулах (34)–(35) получены на основе ограниченного числа наблюдений и не могут быть рекомендованы для расчетов. Для оценки транспорта влекомых наносов активными грядами более целесообразна организация прямых наблюдений на разных реках и исследование движения всего иерархического комплекса гряд.

ТРАНЗИТ ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ГРЯД

Транзит влекомых наносов при перемещении гряд в лабораторных лотках определяется по аккумуляции наносов в отстойниках [25]. На натуральных объектах роль отстойников для влекомых на-

Таблица 2. Транзит влекомых наносов по активным грядам $q_{тр}$, определенный по разности удельных расходов влекомых наносов, измеренных по аккумуляции в подвале крупной пассивной гряды $q_{факт}$ и рассчитанных по формуле (7) по морфометрии и динамике активных гряд q_7 без учета транзитной составляющей (видно, что расчет расхода влекомых наносов по формуле (33) q_{33} в определенной степени учитывает транзит влекомых наносов)

	$q_7, \text{ м}^2/\text{с} \times 10^5$	$q_{факт}, \text{ м}^2/\text{с} \times 10^5$	$q_{тр}, \text{ м}^2/\text{с} \times 10^5$	$100 \times \frac{q_{факт} - q_7}{q_{факт}}, \%$	$q_{33}, \text{ м}^2/\text{с} \times 10^5$
Нигер	1.6	2.75	1.15	42	1.94
продольник 0					
продольник 1	2.0	3.37	1.37	41	2.66
Вычегда	0.66	2.6	1.94	75	2.4
Староостровский					
перекат, нижняя гряда					
Нижне-Шешуровский	1.86	4.22	2.36	56	5.94
перекат, нижняя гряда					
Нижне-Шешуровский	2.53	8.33	5.8	69	12.57
перекат, верхняя гряда					

носов, транзитом перемещающихся по более мелким грядам, часто выполняют крутые низовые откосы крупных асимметричных гряд, где аккумулируются все поступающие сюда влекомые наносы. В качестве примера приведем результаты измерений перемещения гряд в иерархических комплексах на Нигере и Вычегде во время межени (табл. 2).

На Нижне-Шешуровском перекате р. Вычегды исследования проводились с 18 по 31 августа 1997 г. при постоянных значениях гидрологических характеристик: уровне 70–75 см по в/п Федяково, расходе воды 400 м³/с и уклоне водной поверхности 0.085‰. Здесь на гребне переката выделялись две крупные асимметричные гряды длиной 250–300 м и высотой 1.0–1.2 м с крутыми низовыми откосами. Их поверхность была покрыта рифелями. Рифели на поверхности нижней крупной гряды при средней длине 4.1 м имели средний объем 0.4 м³ на 1 м ширины русла, и при их перемещении на низовой откос крупной гряды поступало в среднем 1.86×10^{-5} м³/с влекомых наносов. Объем аккумуляции наносов на низовом откосе нижней крупной гряды существенно отличался от объема поступающих наносов в форме рифелей: средняя интенсивность аккумуляции за период измерений составила 3.58×10^{-5} м³/с. Часть наносов (~18%) проходила низовой откос гряды транзитом, так что полный расход влекомых наносов составил здесь 4.22×10^{-5} м³/с. 50–60% расхода влекомых наносов определялось не грядовым движением в виде рифелей, а их перемещением по рифелям транзитом.

Рифели на поверхности верхней крупной гряды при длине 3.5 м имели средний объем 0.28 м³ на 1 м ширины русла, и при их перемещении на низовой откос крупной гряды поступало в среднем 2.53×10^{-5} м³/с влекомых наносов. Средняя интенсивность аккумуляции на низовом откосе верхней крупной гряды (полный расход влекомых наносов) составила за период измерений 8.33×10^{-5} м³/с. Как минимум 70% аккумуляции определялось не грядовым движением наносов, а их перемещением по рифелям транзитом, влечением и во взвеси.

Наблюдения на Староостровском перекате р. Вычегды проводились с 9 июня по 4 июля 1996 г. при постоянных значениях гидрологических характеристик: среднем уровне 200 см над проектным, расходе воды 1300 м³/с и уклоне 0.08‰. Иерархический комплекс донных форм на Староостровском перекате во время высокой межени был образован рифелями длиной 3–4 м, высотой 0.1–0.2 м, со скоростью перемещения 0.4–0.9 м/ч; дюнами длиной 10–20 м, высотой 0.2–0.4 м, со скоростью перемещения 0.15–0.18 м/ч и застругами длиной 65–75 м, высотой 0.4–0.5 м, со скоростью перемещения 0.08–0.09 м/ч. Анализ динамики системы гряд показывает, что большое значение имеет взаимовлия-

ние гряд разных размеров и транзит влекомых наносов в их подвалах. В нижней части переката крупные гряды (заструги) характеризовались крутым низовым откосом, здесь аккумулировалась основная часть поступающих сверху наносов – $2.4–2.8 \times 10^{-5}$ м³/с. В смещении рифелей вниз по течению участвовало 0.73×10^{-5} м³/с наносов (~28% стока влекомых наносов). Остальные наносы с достаточной длиной прыжка проходили подвалы рифелей транзитом. При перемещении дюн транспортировалось $0.56–0.75 \times 10^{-5}$ м³/с наносов (~25% стока влекомых наносов). Движение заструг на 70–75% определялось наносами, которые не участвовали в движении более мелких гряд, перемещаясь транзитом по дюнам и рифелям.

На Нигере транзит наносов можно было оценить для периода глубокой межени, когда в плесах на пологих асимметричных дюнах сформировались вторичные симметричные дюны. На продольнике 0 в правобережном плесе за период с 31 января по 13 февраля 1979 г. интенсивность аккумуляции в подвале крупной асимметричной дюны составила 2.75×10^{-5} м³/с наносов. За счет смещения более мелких симметричных дюн сюда поступало 1.6×10^{-5} м³/с наносов. Из этого следует, что >40% влекомых наносов транспортировалось по симметричным дюнам транзитом. На продольнике 1 в этом плесе с 18 января по 20 февраля интенсивность аккумуляции в подвалах крупных асимметричных дюн составила 3.37×10^{-5} м³/с наносов. За счет смещения более мелких симметричных дюн сюда поступало 2.0×10^{-5} м³/с наносов, т.е. и на этом продольнике >40% влекомых наносов транспортировалось по симметричным дюнам транзитом.

Транзит влекомых наносов на Нигере существенно меньше, чем на Вычегде, что, вероятно, связано с большей крупностью донных грунтов в русле Нигера. На отдельных участках русла Нигера в межень транзит влекомых наносов почти прекращался (рис. 1б в [19]). В этом (и только в этом) случае можно использовать для оценки стока влекомых наносов формулу (7) без учета транзитной составляющей.

ВЫВОДЫ

Существует два типа перемещения гряд в речном русле — активное и пассивное.

Активное перемещение гряд осуществляется волнообразными структурами поля скоростей потока, которые определяют периодическую смену (в пространстве и во времени) зон размыва и аккумуляции, а также транспорт влекомых наносов. Активные гряды трехмерны, симметричны и движутся без направленного изменения формы, так как все участки поверхности гряды перемещаются с одинаковой скоростью.

Пассивное перемещение гряд происходит за счет транспорта влекомых наносов. Периодиче-

ская смена (в пространстве и во времени) зон размыва и аккумуляции определяется наличием гряд и соответствующим их конфигурации изменением глубин и скоростей потока. Пассивные гряды двухмерны, асимметричны, при перемещении их гребни движутся быстрее ложбин и гряды перекашиваются.

В речных руслах гряды обычно образуют иерархические комплексы, где более мелкие гряды перемещаются по поверхности более крупных. При активном перемещении морфология и динамика гряд разных порядков в иерархии относительно независимы. При пассивном перемещении усиливается взаимосвязь гряд разных порядков.

Транспорт влекомых наносов в речном русле обычно осуществляется как в грядовой, так и в безгрядовой форме. Движение наносов в безгрядовой форме может происходить транзитом по комплексу гряд.

Теоретические решения для оценки транспорта наносов при активном перемещении гряд в настоящее время отсутствуют. Поэтому в гидрометрической практике нужно применять натурные измерения морфологии и динамики иерархического комплекса гряд. Общий расход наносов будет равен сумме расходов, перемещаемых в грядовой форме грядами всех порядков, плюс транзитный расход влекомых наносов, транспортируемых в безгрядовой форме (формула (27)).

В случае пассивного перемещения гряд общий расход влекомых наносов оценивается по морфологии и динамике гряд с крутыми низовыми откосами, где аккумулируются все поступающие сверху наносы (в грядовой и безгрядовой форме). В этом случае можно использовать для расчета транспорта влекомых наносов формулу (7) без учета транзитной составляющей.

Теоретические исследования на основе подхода Экснера показывают также возможность оценки общего расхода влекомых наносов по данным о скоростях пассивного перемещения гряд (по формулам (29), (31) и (33)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
2. *Алексеевский Н.И., Горбатенко А.В.* Физико-географические аспекты транспорта влекомых наносов на равнинных реках // Вест. МГУ. Сер. 5. География. 1989. 4. С. 61–68.
3. *Алексеевский Н.И., Сидорчук А.Ю.* Морфология и динамика рельефа русла в нижнем течении Терека // Земельные и водные ресурсы. М.: Изд-во МГУ, 1990. С. 87–95.
4. *Беркович К.М., Лодина Р.В., Сидорчук А.Ю.* Русловой режим р. Нигера в районе металлургического завода у г. Аджакута // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 9. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 127–145.
5. *Войнич-Сяноженский Т.Г.* Гидродинамика устьевых участков рек и взморий бесприливных морей. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 203 с.
6. *Гришанин К.В.* О механизме образования песчаных гряд // Тр. ЛИВТ. Вып. 34. 1962. С. 5–14.
7. *Гришанин К.В.* Устойчивость русел рек и каналов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 144 с.
8. *Гришанин К.В.* Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 312 с.
9. *Знаменская Н.С.* Использование закономерностей грядового движения наносов при расчете русловых деформаций // Тр. ГГИ. Вып. 120. 1965. С. 3–24.
10. *Знаменская Н.С.* Грядовое движение наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 188 с.
11. *Знаменская Н.С.* Донные наносы и русловые процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 192 с.
12. *Знаменская Н.С.* Гидравлическое моделирование русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 240 с.
13. *Михайлова Н.А.* Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 234 с.
14. *Поляков Б.В.* Исследование стока взвешенных и донных наносов. Л.: ГГИ, 1934. 129 с.
15. *Поляков Б.В.* Методика исследования речных наносов и перекатов. М.; Л.: ГИМИЗ, 1940. 76 с.
16. *Снищенко Б.Ф., Копалиани З.Д.* О скорости движения гряд в реках и лабораторных условиях // Тр. ГГИ. 1978. Вып. 252. С. 30–37.
17. *Сидорчук А.Ю.* Морфология и динамика рельефа русла нижнего Нигера // Проблемы морфодинамики. М.: ГО СССР, 1983. С. 21–38.
18. *Сидорчук А.Ю.* Динамика грядового рельефа русла р. Нигер // Гидрофизические процессы на реках и водохранилищах. М.: Наука, 1985. С. 162–168.
19. *Сидорчук А.Ю.* О расчетах смещения донных гряд и расхода влекомых наносов // Вод. ресурсы. 1990. № 5. С. 56–63.
20. *Сидорчук А.Ю.* Структура рельефа речного русла. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 127 с.
21. *Сидорчук А.Ю.* Морфология и динамика форм руслового рельефа на устьевом участке р. Терека // Каспийское море. Гидрология устьев рек Терека и Сулака. М.: Наука, 1993. С. 89–102.
22. *Allen J.R.L.* River Bedforms: Progress and Problems // Modern and Ancient Fluvial Systems / Eds. Collinson J.D., Lewin J. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2009. P. 19–33.
23. *Exner F.M.* Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen // Sitzungsberichte der Academie der Wissenschaften. 1925. Sec. 2A. P. 134, 165–180.
24. *Gaeuman D., Jacobson R.B.* Field Assessment of Alternative Bed-Load Transport Estimators // J. Hydraulic Eng. 2007. V. 133. № 12. P. 1319–1328.
25. *Guy H.P., Simons D.B., Richardson E.V.* Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956–61 // USGS Professional Paper: 462-I. 1966. 96 p.
26. *Kennedy J.F.* The Formation of Sediment Ripples, Dunes, and Antidunes // Ann. Rev. Fluid Mech. 1969. V. 1. P. 147–168.
27. *Kubatko E.J., Westerink J.J.* Exact Discontinuous Solutions of Exner's Bed Evolution Model: Simple Theory for Sediment Bores // J. Hydraulic Eng. 2007. V. 133. № 3. P. 305–311.
28. *Simons D.B., Richardson E.V., Nordin C.F.* Bedload equation for ripples and dunes // USGS Professional Paper: 462-H. 1965. 9 p.