

Ш. Р. Поздняков, М. В. Шмакова

РАСЧЕТ РАСХОДА ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ НА РЕКАХ С КРУПНОФРАКЦИОННЫМИ ДОННЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

Sh. R. Pozdnjakov, M. V. Shmakova

CALCULATION OF SEDIMENT DISCHARGE FOR LARGE FRACTION BED RIVERS

Настоящее исследование посвящено сравнительному анализу восьми расчетных формул расхода влекомых наносов в приложении для рек с крупнофракционными донными отложениями. Вычисления проводились по данным экспериментов на гидравлических лотках и для небольшой горной реки Ала-Арча. Надежность результатов вычисления расходов наносов по реке представлена тем, что данные наблюдений за гидравлическим режимом обеспечены качественной информацией о расходе влекомых наносов на этом водотоке.

Ключевые слова: *влекомые наносы, речной поток, формула.*

The present study focuses on the comparative analysis of eight sediment discharge formulas in the appendix to large fraction bed rivers. Calculations were carried out according to experiments on hydraulic trays and small mountain river Ala-Archa. The reliability of the results of calculation of the costs of sediment on the river is represented by the fact that the observations of the hydraulic regime provided qualitative information about the flow of bed sediments in this watercourse.

Keywords: *bed sediments, river flow, formula.*

Общие положения

Как известно, оценка расхода влекомых наносов естественных водотоков является одной из наиболее сложных гидравлических задач. К сожалению, приходится констатировать, что в последнее время активность в развитии новых подходов к решению данной проблемы является недостаточной. При этом основное затруднение заключается в отсутствии надежной верификации предлагаемых расчетных формул по данным натурных наблюдений.

Формулы расхода влекомых наносов могут быть ориентированы как на непосредственно движение отдельных частиц влекомых наносов, так и на грядовую форму движения наносов. Формулы, описывающие грядовую форму движения наносов, учитывают геометрические характеристики гряд — длину, высоту и так далее — и могут использоваться для рек с песчаным дном. Такие формулы обеспечены относительно достоверными данными наблюдений за расходами наносов, что позволяет оптимизировать как структуру формулы, так и ее параметры.

Наибольшую сложность в измерении расхода наносов представляют влекомые наносы в реках с галечно-гравийным дном. Это, соответственно, затрудняет апробацию формул расхода влекомых наносов и оптимизацию структуры и параметров этих формул.

В связи с этим особенную ценность представляют данные наблюдений за влекомыми наносами на водотоках, произведенные в рамках уникальных авторских исследований твердого стока. К такому исследованию относятся наблюдения за режимом горной реки Ала-Арча и измерение ее гидравлических характеристик, проведенные в середине 80-х годов прошлого столетия [3]. Расходы влекомых наносов были измерены посредством разработанной Ш.Р. Поздняковым конструкцией регистратора движения наносов, основанной на учете ударов движущихся частиц о приемные устройства с последующим пьезометрическим преобразованием энергии ударов и специально разработанных конструкций удлиненных сетчатых батометров с гибким дном. Применение данных устройств для измерения расходов влекомых наносов на указанной реке позволило получить достаточно надежные количественные результаты, которые можно использовать для верификации соответствующих формул для вычисления расходов влекомых наносов.

Формулы расхода влекомых наносов

В настоящее время существует несколько сотен формул расхода взвешенных и влекомых наносов. Некоторые исследователи выделяют следующие группы формул расчета расхода влекомых наносов [5]:

1. Зависимость расхода наносов от гидравлических характеристик потока $R = f(v, H, I)$ (Шамов, Леви, Гончаров, Гришанин).
2. Связь расхода наносов с водностью (расходом воды) потока $R = f(Q)$ (Мейер-Петер, Шоклич).
3. Связь расхода наносов с влекущей силой потока $R = f(\tau = \rho gHI)$ (Егиазаров).
4. Формулы, где прописан стохастический характер движения наносов (Эйнштейн, Великанов).

Приведем ниже некоторые формулы расхода влекомых наносов.

Формула А.Шоклича:

$$G = B \frac{7000}{\sqrt{d}} I^{3/2} (q - q_0), \quad q_0 = 0,00001944 \frac{d}{I^{4/3}}, \quad (1)$$

где G — расход донных наносов, кг/с; B — ширина потока, м; q — элементарный расход воды, м²/с; d — средний диаметр частиц, мм; I — уклон русла, б/р.

Формула Г.И. Шамова (для $d \geq 0,1-0,2$ мм):

$$G = B \cdot 0,95 \sqrt{d} \left(\frac{v}{v_{отл}} \right)^3 [v - v_{отл}] \left(\frac{d}{h} \right)^{1/4}, \quad v_{отл} = 3,83d^{1/3} h^{1/6}, \quad (2)$$

где d — средний диаметр частиц, м; v — средняя скорость потока, м/с; h — средняя глубина потока, м.

Формула И.В. Егузарова:

$$G = c'Q \cdot \frac{\rho_{\text{грунта}} \rho_{\text{воды}}^2}{(\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}})^2} \left[1 - \frac{0,012(\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}})d}{c' \rho_{\text{воды}} h I} \right] \left(\frac{h}{d} \right) I^{3/2}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{воды}}$ и $\rho_{\text{грунта}}$ — плотность воды и грунта, кг/м³; c' — безразмерный коэффициент (для рек принимается равным 0,2, для лабораторных условий 0,45).

В ВСН-83 [1] для рек с $I > 0,01$ рекомендована следующая формула для расчета расхода влекомых наносов

$$G = 7000Q \left[\frac{h}{d} \right]^{0,7} I^{2,2}, \quad (4)$$

где Q — расход воды; d — средний диаметр частиц, мм.

Формула К.В. Гришанина:

$$G = 0,015B \left(\frac{v}{v_H} \right)^3 d(v - v_H), \quad v_H = \lg \frac{8,8h}{d_5} \sqrt{\frac{2g(\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}})}{3,5\rho_{\text{воды}}}} d, \quad (5)$$

где v_H — неразрывающая скорость потока, м/с; d_5 — диаметр частицы обеспеченностью 5 %, м; d — средний диаметр частиц, м.

Формула В.Н. Гончарова:

$$G = 2,08B \left(\frac{v}{v_H} \right)^3 d(v - v_H) \left(\frac{d}{h} \right)^{0,1}, \quad v_H = 0,96 \sqrt{gd^{0,4}} (d + 0,0014)^{0,6} \left(\frac{h}{d} \right)^{0,2}, \quad (6)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; d — средний диаметр частиц, м.

Формула И.И. Леви:

$$G = 2B\rho_{\text{грунта}} \left(\frac{v}{\sqrt{gd}} \right)^3 d(v - v_H) \left(\frac{d}{h} \right)^{0,25}, \quad v_H = 1,4\sqrt{gd} \lg \frac{12h}{d_{10}}, \quad (7)$$

где d — средний диаметр частиц, м; d_{10} — диаметр частицы обеспеченностью 10 %, м.

Аналитическая формула расхода наносов [4, с. 52] полученная как следствие уравнения баланса сил, действующих в системе «водный поток — донные отложения — наносы», имеет вид

$$G = \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} Q \left[\frac{c}{hg} - (1-f)\rho_{\text{воды}} I \right], \quad (8)$$

где f — коэффициент внутреннего трения, б/р; c — сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²).

Формула (8) содержит две основные группы членов — силы гравитации (сдвигающая проекция силы тяжести потока — $\rho_{\text{воды}} I$) и силу трения, или сопротивление грунта сдвигу ($c/(hg) + \rho_{\text{воды}} f I$). Параметры f и c формулы (8) в настоящее время уточняются [4].

Следует заметить, что расход наносов в (8) является общим, в него включены и взвешенные и влекомые наносы. Для горных потоков в условиях, когда основную часть стока наносов представляют влекомые, эта формула может быть использована для расчета расхода влекомых наносов.

Расчет расхода влекомых наносов на водотоках с крупнофракционным дном

Вычисления расхода влекомых наносов проводились для данных экспериментов на гидравлическом лотке [2] и для горной реке Ала-Арча, расположенной в Киргизском Алатау (Тянь-Шань) [3].

1. Лотки с гравийным дном (Клавен, Копалиани, 2011). На основании опытов на гидравлическом лотке лаборатории ГГИ [2] шириной 0,5 м с гравийным дном была проведена серия экспериментов. Данные экспериментов опубликованы в книге А.Б. Клавена и З.Д. Копалиани (2011). Гидравлические характеристики потока в экспериментах задавались в следующих диапазонах:

- расходы воды — 20... 150 л/с;
- средняя скорость потока — 0,53... 2,9 м/с;
- средняя глубина потока — 0,05... 0,3 м;
- уклон дна — 0,003... 0,03;
- относительная шероховатость (d/h) — 0,025... 0,2;
- средний диаметр донных отложений $d_{50\%}$ составил 6,5 мм.

2. Река Ала-арча (Поздняков, 2012). Река Ала-Арча представляет собой небольшой горный поток с половодьем в теплой части года. Основные гидравлико-морфометрические характеристики реки Ала-Арча в створе устье р. Кашкасу (по данным наблюдений в 1985 и 1986 гг.):

- средняя скорость потока — 2,11... 2,68 м/с;
- средняя глубина — 0,64... 1,01 м;
- уклон водной поверхности — 0,027... 0,03;
- относительная шероховатость (d/h) — 0,14... 0,3;
- средний диаметр донных отложений $d_{50\%}$ составил 145 мм.

В период 1985 и 1986 г. на реке были проведены измерения гидравлических характеристик потока и расхода влекомых наносов. Последнее осуществлялось посредством разработанного Ш.Р. Поздняковым [3] пьезоэлектрического регистратора движения крупнофракционных наносов (РДН).

3. Результаты вычислений. В представленных ниже таблицах 1–3 приведены данные для расчета и результаты вычислений.

Следует заметить, что при расчетах расхода влекомых наносов по данным экспериментов на лотках и по данным наблюдений на р. Ала-Арча по аналитической формуле расхода наносов (8) были оценены параметры этой формулы. Значения эти параметров составили: $f = 0,99$ и $c = 2,5$ — для галечного русла реки Ала-Арча и $f = 1,3$ и $c = 0,1$ — для гравийного дна лотка.

Таблица 1

Данные для расчета расхода влекомых наносов по данным экспериментов на лотках [2] и результаты вычислений (средний диаметр наносов 6,5 мм; ширина лотка 0,5 м)

Уклон, б/р	Глубина, м	Скорость, м/с	Расход воды, м ³ /с	Расход наносов измеренный, кг/с	Расход наносов по ф-ле Шоклица, кг/с	Расход наносов по ф-ле Шамова, кг/с	Расход наносов по ф-ле Егизарова, кг/с	Расход наносов по ф-ле ВСН-83, кг/с	Расход наносов по ф-ле Гришанина, кг/с	Расход наносов по ф-ле Леви, кг/с	Расход наносов по ф-ле Гончарова, кг/с	Расход наносов по ф-ле Шмаковой, кг/с
0,0070	0,150	1,07	0,080	0,143	0,05277	0,08	1,00	0,00073	0,000166	0,41	0,03	0,207
0,0070	0,230	1,14	0,128	0,225	0,12996	0,08	1,60	0,00157	0,000167	0,45	0,03	0,211
0,0070	0,200	1,28	0,128	0,200	0,12996	0,15	1,60	0,00142	0,000329	0,81	0,06	0,245
0,0200	0,180	1,61	0,150	1,172	1,07449	0,48	3,18	0,01560	0,001040	2,33	0,18	0,290
0,0300	0,190	1,57	0,150	1,800	2,04331	0,41	3,89	0,03953	0,000895	2,04	0,15	0,248
0,0300	0,110	1,81	0,100	1,300	1,32997	1,22	2,59	0,01798	0,002441	4,60	0,44	0,321
0,0200	0,090	1,73	0,078	0,702	0,51536	1,17	1,65	0,00499	0,002299	4,08	0,42	0,326
0,0200	0,070	1,85	0,075	0,690	0,49206	1,93	1,59	0,00403	0,003702	5,91	0,69	0,410
0,0200	0,060	2,5	0,075	0,619	0,49206	7,88	1,59	0,00361	0,015073	21,61	2,76	0,483
0,0300	0,070	2,90	0,100	1,823	1,32997	13,03	2,59	0,01310	0,025223	37,88	4,57	0,531
0,0300	0,075	2,00	0,075	1,102	0,97331	2,55	1,95	0,01031	0,004938	7,99	0,91	0,369
0,0300	0,055	1,74	0,047	0,720	0,57384	1,79	1,22	0,00520	0,003402	4,98	0,63	0,324
0,0300	0,050	1,60	0,040	0,482	0,47397	1,35	1,04	0,00414	0,002542	3,64	0,47	0,305
0,0300	0,075	1,27	0,047	0,720	0,57384	0,34	1,22	0,00646	0,000652	1,18	0,13	0,232
0,0100	0,090	1,06	0,048	0,200	0,05127	0,13	0,72	0,00067	0,000238	0,50	0,05	0,208
0,0100	0,085	1,21	0,051	0,143	0,05951	0,25	0,76	0,00068	0,000472	0,91	0,09	0,235
0,0100	0,075	0,85	0,032	0,132	0,00734	0,05	0,48	0,00039	0,000090	0,20	0,02	0,168
0,0100	0,055	0,80	0,022	0,105	—*	0,05	0,33	0,00022	0,000088	0,18	0,02	0,159
0,0100	0,110	1,27	0,070	0,200	0,11168	0,25	1,05	0,00112	0,000487	1,01	0,09	0,247
0,0100	0,140	1,47	0,099	0,405	0,19130	0,39	1,48	0,00188	0,000810	1,73	0,15	0,271
0,0100	0,195	1,45	0,145	0,580	0,31760	0,28	2,17	0,00347	0,000608	1,43	0,11	0,278
0,0050	0,210	1,43	0,150	0,414	0,07388	0,25	1,59	0,00082	0,000542	1,30	0,09	0,278
0,0050	0,090	0,88	0,040	0,083	—*	0,05	0,42	0,00012	0,000092	0,22	0,02	0,177
0,0050	0,130	1,15	0,075	0,167	0,00107	0,13	0,79	0,00029	0,000266	0,60	0,05	0,228
0,0050	0,165	1,34	0,110	0,360	0,03505	0,22	1,16	0,00051	0,000469	1,08	0,08	0,261
0,0030	0,130	1,00	0,065	0,080	—*	0,07	0,53	0,00008	0,000131	0,32	0,03	0,199
0,0030	0,240	1,25	0,150	0,450	0,00179	0,12	1,23	0,00029	0,000258	0,67	0,04	0,246
0,0038	0,220	1,36	0,150	0,428	0,02795	0,19	1,38	0,00046	0,000414	1,02	0,07	0,267
0,0050	0,230	1,20	0,138	0,389	0,06223	0,10	1,46	0,00081	0,000217	0,57	0,04	0,232
0,0041	0,227	1,18	0,142	0,260	0,03296	0,09	1,36	0,00053	0,000201	0,53	0,04	0,244
0,0028	0,265	1,07	0,142	0,105	—*	0,05	1,13	0,00026	0,000108	0,31	0,02	0,211
0,0030	0,176	1,56	0,138	0,414	—*	0,43	1,13	0,00022	0,000913	2,05	0,16	0,311

Примечание. * — В рассчитанных расходах наносов имели место отрицательные значения.

Таблица 2

Данные для расчета расхода влекомых наносов по р. Ала-Арча [3] и результаты вычислений (средний диаметр наносов 145 мм)

Уклон, б/р	Глубина, м	Скорость, м/с	Ширина, м	Расход воды, м ³ /с	Расход наносов измеренный, кг/с	Расход наносов по ф-ле Шоклича, кг/с	Расход наносов по ф-ле Шамова, кг/с	Расход наносов по ф-ле Еггазарова, кг/с	Расход наносов по ф-ле ВСН-83, кг/с	Расход наносов по ф-ле Гришанина, кг/с	Расход наносов по ф-ле Гончарова, кг/с	Расход наносов по ф-ле Шмаковой, кг/с
0,03	0,71	2,18	10,85	16,80	2,08	40,83	1,11	19,5	1,27	0,00297	4,44	1,57
0,03	0,75	2,24	10,77	18,10	1,60	44,83	1,33	21,0	1,42	0,00399	4,92	1,15
0,03	0,75	2,50	10,83	20,30	1,23	51,43	3,35	23,5	1,59	0,01591	9,65	1,28
0,03	0,74	2,13	10,85	17,10	1,51	41,74	0,78	19,8	1,33	0,00092	3,60	1,21
0,03	0,79	2,42	10,57	20,20	0,96	51,37	2,38	23,4	1,64	0,00997	7,36	0,73
0,03	0,73	2,28	10,51	17,50	0,70	43,26	1,60	20,3	1,35	0,00579	5,55	1,37
0,03	0,72	2,60	10,58	19,80	0,76	50,15	4,53	23,0	1,51	0,02343	12,28	1,70
0,03	0,76	2,22	10,79	18,20	0,81	45,12	1,18	21,1	1,44	0,00312	4,58	1,02
0,03	0,78	2,34	10,52	19,20	0,60	48,39	1,82	22,3	1,55	0,00679	6,06	0,82

Таблица 3

Средние относительные отклонения между рассчитанными по разным формулам и наблюдаемыми расходами влекомых наносов, %

Формулы расхода влекомых наносов	Среднее относительное отклонение, %	
	лоток	р. Ала-Арча
А. Шоклич (1)	49*	4730
Г.И. Шамова (2)	113	145
И.В. Еггазаров (3)	292	2100
Формула из ВСН-83 для рек, с $I > 0,01$ (4)	100**	65
К.В. Гришанин (5)	100**	100**
В.Н. Гончаров (6)	77	600
И.И. Леви (7)	414	—*
Аналитическая формула расхода наносов (М.В. Шмакова) (8)	32	42

Примечание. * — в рассчитанных расходах наносов имели место отрицательные значения; ** — рассчитанные расходы наносов близки к нулю.

Наименьшие значения среднего относительного отклонения между рассчитанными и наблюдаемыми расходами влекомых наносов для данных экспериментов на лотках составили 49 и 32 % по формулам (1) и (8), для реки Ала-Арча — 42 % по формуле (8) и 656% по формуле (4).

На рис. 1 приведены зависимости наблюдаемых на реке Ала-Арча и рассчитанных по формулам (4) и (8) расходов наносов, а на рис. 2 — зависимости наблюдаемых на лотках и рассчитанных по формулам (1), (6) и (8) расходов наносов.

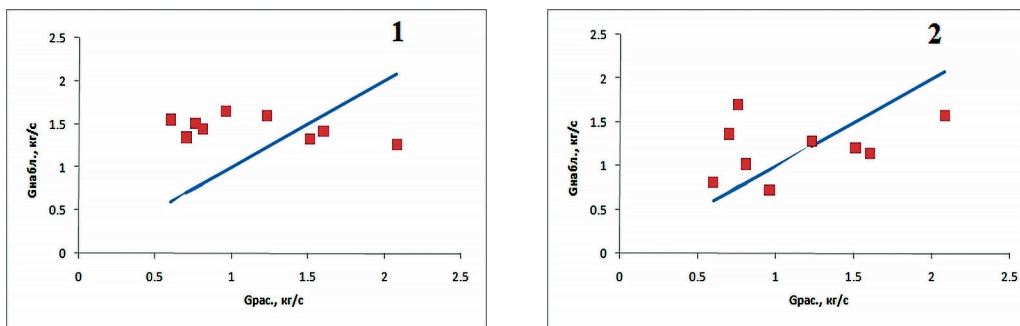


Рис. 1. Зависимости наблюдаемых на реке Ала-Арча и рассчитанных по формулам (4) — 1 и (8) — 2 расходов наносов

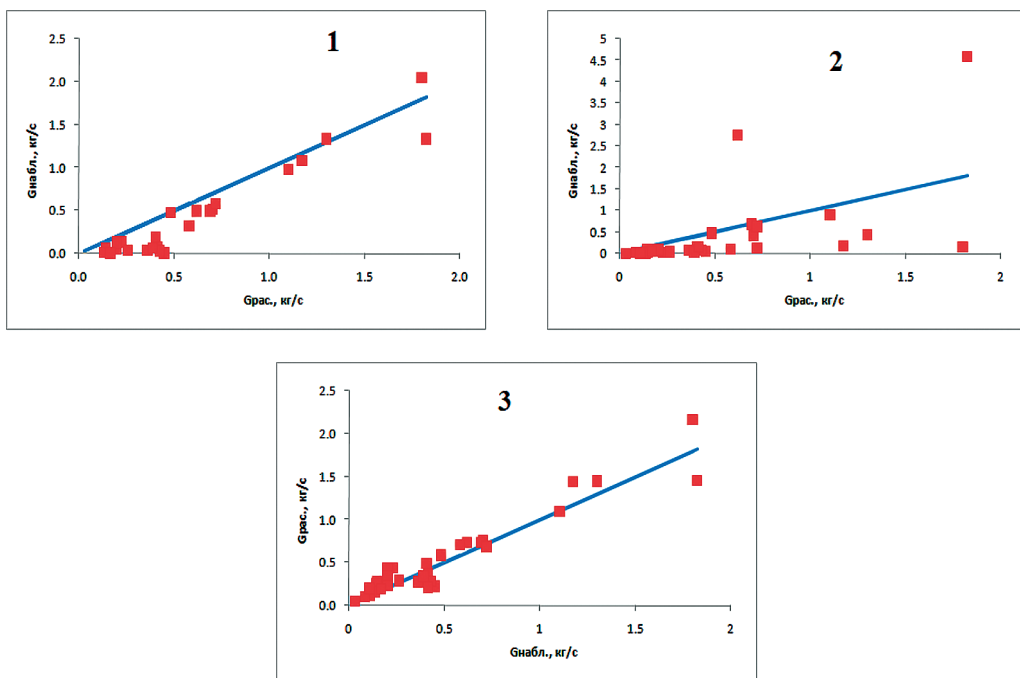


Рис. 2. Зависимости наблюдаемых на лотках и рассчитанных по формулам (1) — 1, (6) — 2 и (8) — 3 расходов наносов

Выводы

В результате выполненного исследования получен сравнительный анализ восьми расчетных формул расхода влекаемых наносов в приложении для рек с крупнофракционными донными отложениями. Вычисления проводились по данным экспериментов

на гидравлических лотках и для горной реки Ала-Арча. Уникальность вычисления расходов наносов на данной реке представлена тем, что результаты наблюдений за гидравлическим режимом обеспечены качественной информацией о расходах влеко-
мых наносов на этом водотоке [3].

Наилучшие результаты вычислений получены по аналитической формуле расхода наносов [4]. Среднее относительное отклонение наблюдаемых и рассчитанных значений расходов наносов составило 32 % для данных экспериментов на лотках и 42 % для реки Ала-Арча. При этом следует заметить, что значения параметров формулы (8) несколько отличается от значений, рекомендованных для расчета расхода наносов неизученных рек [5]. Это объясняется тем, что при оценке параметров и их последующем обобщении в качестве данных наблюдений на горных и полугорных водотоках принимались во внимание как расходы влеко-
мых, так и расходы взвешенных наносов. Однако точность измерения расхода влеко-
мых наносов традиционными методами крайне низкая, и это при том, что для рек указанного типа вклад расхода влеко-
мых наносов в общий расход наносов достаточно велик.

Таким образом, параметры формулы (8) для водотоков с крупнофракционными донными отложениями необходимо уточнить на качественном натурном материале. И первым шагом в уточнении параметров могут явиться полученные в настоящей работе результаты.

Литература

1. ВСН 163–83. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). — М.: Миннефтегазстрой, 1985. — 117 с.
2. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. — СПб.: Нестор-История, 2011. — 544 с.
3. Поздняков Ш.Р. Проблемы расчета и измерения характеристик наносов в водных объектах. — СПб.: Изд-во «Лема», 2012. — 226 с.
4. Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Анализ и расчеты твердого стока (на примере североамериканских рек) // Учен. зап. РГГМУ. 2016. № 43. — С. 51–66.
5. Шмакова М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. — СПб.: Изд-во «Лема», 2013. — 142 с.