

УДК 556.5;556.012;556.043

## ПРИЧИНЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ БЫСТРЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ВЗВЕСЕЙ В МАЛОЙ ГОРОДСКОЙ РЕКЕ СЕТУНЬ

© 2024 г. С. Р. Чалов<sup>1</sup>, О. Д. Лошков<sup>1</sup>, Е. А. Крастынь<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: krastyn-e@mail.ru

Поступила в редакцию 04.09.2024 г.

После доработки 13.09.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Современные измерительные технологии открывают новые горизонты в изучении природных явлений, в том числе связанных с гидрологическими процессами, и в частности — транспортом наносов. В статье обсуждаются результаты натурных экспериментов с лазерным дифрактометром LISST-200X, единственным в мировой практике средством регистрации крупности взвеси и мутности воды в потоке. Исследования были выполнены в начале 2024 г. в нижнем течении р. Сетуни, являющейся крупнейшим притоком р. Москвы в пределах г. Москвы, и представляли собой высокочастотные (с дискретностью 10 сек) продолжительные записи (всего 49 ч) характеристик транспорта взвесей в потоке. Совмещение с отборами проб на измерение оптической и весовой мутности позволило определить ограничения использования средств измерений подобного типа. Воспроизводимость гранулометрического состава взвешенных наносов по данным высокочастотного мониторинга оказалась хуже, чем их концентрации. Данные LISST-200X в среднем почти в 2 раза превышают величину крупности взвеси по сравнению с лабораторным определением крупности, что частично объясняется включением в измеряемый диапазон крупных частиц (более 500 мкм), однако стабильно воспроизводят относительные изменения гранулометрического состава. В ходе экспериментов на р. Сетуни выявлены непродолжительные (до 95 мин) увеличения мутности и крупности взвеси (плюмы), вероятнее всего имеющие антропогенный генезис, и характеризующиеся гистерезисными связями между мутностью воды и составом взвесей. Во всех случаях на волне подъема мутности крупность взвешенных наносов ниже, чем на спаде. Этот результат характеризует ранее неисследованный феномен транспорта наносов ниже участков их точечного поступления в русловые потоки — гидравлическую сортировку по длине реки, когда более легкие частицы перемещаются быстрее более крупных и тяжелых частиц (в том числе органических). Полученные оценки представляются важными как для мониторинга антропогенного воздействия, так и для развития теории речных наносов.

**Ключевые слова:** LISST, лазерная дифракция, взвешенные наносы, гранулометрический состав, высокочастотный мониторинг

**DOI:** 10.31857/S2587556624060043, **EDN:** AKLQLY

### ВВЕДЕНИЕ

Эрозионные процессы, сбросы ливневых вод на селитебных землях, вод от промышленных и горнорудных предприятий и сельскохозяйственных систем формируют потоки наносов, перемещаемых по длине рек. За счет суперпозиции разных источников, отличий в их величине и продолжительности воздействия наносы имеют разный минералогический, гранулометрический и химический состав, трансформация которого в реках зависит от гидродинамических особенностей потока, физико-химических и биологических продукционно-деструкционных процессов. Если исследования мутности воды и стока наносов — развитая тема в гидроло-

гии и флювиальной геоморфологии (Guy, 1970; Reid and Dunne, 2016; Syvitski and Milliman, 2007), то оценки их состава до настоящего времени опирались в основном на дискретные и относительно редкие пробы, анализируемые на основе трудоемких лабораторных фракциометрических методов. В результате при изучении механического (гранулометрического) состава взвешенных наносов охарактеризованы были его географические закономерности и особенности внутригодовой изменчивости (Лопатин, 1952; Xu, 2000), однако быстрые колебания крупности взвесей, в том числе возникающие при распространении загрязняющих веществ ниже кратковременных точечных сбросов и за счет турбулентных колебаний мутности воды (Чалов, Цыпленков, 2020),

не исследовались в силу отсутствия возможностей измерения подобных явлений. В то же время они являются важнейшими для решения гидрологических прикладных и мониторинговых задач.

Появление лазерных гранулометров (Blott, Pae, 2001; Gray, Gartner, 2009) существенно расширило возможности изучения механического состава наносов. С их помощью были созданы обширные массивы данных, на основе которых изучены закономерности распространений фракций разного размера в реках разных природных условиях (Чалов, Ефимов, 2021), особенности вертикального распределения взвесей разной крупности (Bouchez et al., 2011; Gao et al., 2015; Szupiany et al., 2019). Важнейшим направлением исследований стало обоснование роли крупности взвесей как интегрального фактора формирования их химического состава (Chalov et al., 2020; Lupker et al., 2011).

Создание серии приборов LISST (сокращение от Laser in-situ Scattering and Transmissometry), в которых принцип лазерной дифракции осуществлен “*in-situ*” и которые проводят измерения непосредственно в потоке, открыло широкие возможности изучения временных колебаний состава взвешенных наносов. Пионерные исследования в этом направлении были выполнены авторами в начале 2024 г. на р. Сетуни, где были проведены эксперименты с прибором LISST-200X, экспонируемом на продолжительные интервалы времени в русловом потоке. Учитывая, что р. Сетунь — малая река Московской агломерации, имеет сильно урбанизированный бассейн, 30% площади водосбора которого приходится на застроенные территории, и характеризуется большим объемом неконтролируемых сбросов, проведение подобных измерений позволило исследовать особенности изменений состава взвеси в речном потоке в условиях высокой антропогенной нагрузки, что и стало целью данной статьи. Учитывая пионерный характер применения прибора, в работе решались задачи оценки его погрешностей (1), а также определения масштабов сезонных и суточных колебаний крупности взвесей в малой городской реке (2) и анализа причин их быстрых (продолжительностью в несколько часов) изменений, наблюдавшихся в реке во время проведения экспериментов (3).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принцип работы прибора LISST-200X заключается в следующем: посылается лазерный луч, мощность которого измеряется специальным датчиком; затем луч поддается коллимации, то есть создается параллельно идущий поток излучения (Zhao et al., 2018). Далее лазерный

луч проходит через пропускающее стекло, попадает в водную среду, где рассеивается на частицах под разными углами. Рассеянный луч попадает на приемное стекло, где установлен светофильтр для подавления дневного света, причем углы после рассеяния частицами не изменяются. После этого рассеянные лучи направляются в фокальную плоскость приемного объектива, где установлена фокусирующая линза, которая перенаправляет лучи на кольцевой детектор, представляющий собой набор кремниевых 60-градусных дуг. Каждая дуга охватывает небольшой диапазон углов рассеяния, а кольцевидная форма используется для достижения стабильности инверсии в содержание взвеси. Количество этих дуг равно количеству диапазонов размеров, на которые можно разделить все зафиксированные частицы. В лазерных дифрактометрах при решении уравнений для пересчета рассеяния луча в концентрацию частицы принято считать твердыми непористыми сферическими. Рассеяние света любой сферической частицей с произвольным размером рассматривается в рамках теории Ми, являющейся полностью аналитическим решением уравнений Максвелла для рассеяния электромагнитного излучения сферическими частицами. Происходит преобразование набора измерений рассеяния света под многими углами в гранулометрический состав. Крупность частиц, доступная прибору для измерений — от 1 до 500 мкм, концентрация взвешенных веществ — до 2000–2500 тыс. мкл/л. Она может колебаться в зависимости от условий среды, также, с превышением концентрации взвешенных веществ ~1200 мкл/л, при этом снижается точность измерений, а прибор занижает истинные значения (Zhao et al., 2018).

Натурные эксперименты с прибором LISST-200X заключались в непрерывном измерении крупности взвесей (в работе анализировался только средний диаметр,  $D$  (мкм)) и объемной мутности ( $S_v$ , мкл/л) воды в течение 7 дней с 9 февраля по 2 апреля 2024 г. одновременно с измерением уровня и расхода воды в нижнем течении р. Сетуни (1.86 км выше ее впадения в р. Москву) на действующем здесь с 2019 г. посту (Чалов и др., 2023). Дискретность измерений LISST составляла 10 сек, уровней и расходов воды — 30 мин. Суммарное время работ прибора составило более 49 ч, за которые было получено 15521 измерение  $D$  и  $S_v$ , после первичного анализа было оставлено 15143 измерения (табл. 1). Основными причинами отбраковки части данных стали нахождение прибора вне воды во время измерений, а также прохождение сквозь оптическую ось субстанций, приводящих к многократному увеличению фиксируемых значений крупности до величины 500 мкм.

**Таблица 1.** Почасово округленные данные о среднем диаметре и объемной концентрации взвешенных веществ в р. Сетуни

D <sub>ср</sub> , мкм	09.02.2024	27.02.2024	02.03.2024	12.03.2024	19.03.2024	29.03.2024	02.04.2024
7:00–8:00	—	—	—	—	—	40.88	—
	—	—	—	—	—	209.4562	—
8:00–9:00	—	—	—	—	—	38.89	31.55
	—	—	—	—	—	206.3112	427.8211
9:00–10:00	—	—	—	—	—	36.06	32.88
	—	—	—	—	—	221.7563	436.7317
10:00–11:00	—	—	47.62	—	—	34.84	32.60
	—	—	131.0972	—	—	243.3488	449.2575
11:00–12:00	—	49.16	49.10	—	—	34.64	33.02
	—	147.0665	119.3854	—	—	237.1066	400.6105
12:00–13:00	—	48.06	47.78	58.81	—	35.06	32.87
	—	150.8757	129.6398	83.4632	—	218.2222	380.9191
13:00–14:00	—	58.24	49.73	57.03	58.84	36.18	32.31
	—	257.1180	230.5458	88.7294	166.3263	184.9096	364.6521
14:00–15:00	39.80	45.14	—	56.94	58.62	34.93	31.73
	139.8153	148.5016	—	91.7831	166.6757	200.4106	369.0646
15:00–16:00	35.97	46.45	—	49.63	55.01	34.46	31.85
	138.4305	123.1103	—	116.5024	176.6596	223.4391	410.9098
16:00–17:00	—	—	—	52.77	62.77	38.10	32.97
	—	—	—	105.5073	183.5148	205.6042	472.9506
17:00–18:00	—	—	—	—	68.09	35.14	37.32
	—	—	—	—	182.4511	217.9591	693.7640
18:00–19:00	—	—	—	—	81.10	35.65	34.48
	—	—	—	—	359.7097	206.3572	786.2264
19:00–20:00	—	—	—	—	68.53	33.57	30.59
	—	—	—	—	364.1063	220.4985	824.4460
20:00–21:00	—	—	—	—	64.49	34.61	27.14
	—	—	—	—	901.2954	213.9815	480.9809
Расход воды, м <sup>3</sup> /с	1.74	1.84	2.03	1.82	2.88	6.08	8.26

*Примечание:* верхняя строка — средняя крупность взвеси, мкм; нижняя строка — объемная концентрация, мкл/л.

Для оценки достоверности работы LISST-200X одновременно с записью проводились отборы проб воды в точке установки прибора, которые в дальнейшем были профильтрованы через мембранные фильтры Millipore с диаметром пор 0.45 мкм, определена весовая мутность SSC (мг/л) и на лабораторном лазерном гранулометре Fritsch Analysette 22 — распределение гранулометрического состава. Дискретность отбора проб составила 2 ч, всего за время экспериментов было отобрано 18 проб.

Дополнительно каждые 10 мин проводился отбор проб для определения оптической мутности портативным турбидиметром HACH 2100P. Полученные значения оптической мутности (Т) использовались для восстановления ряда весовой мутности (SSC) в период наблюдений по региональному уравнению связи:  $SSC = 0.8T + 1.4$  (Sokolov et al., 2020).

Метеорологическая обстановка во время экспериментов была примерно одинакова — сплошная или значительная облачность, без осадков.

Исключением стало 29 марта — было мало-облачно, наблюдались кратковременные осадки. Расходы воды изменялись от 1.74 м<sup>3</sup>/с 9 февраля до 8.26 м<sup>3</sup>/с 2 апреля, когда на р. Сетуни наблюдался пик половодья.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление результатов измерения объемной  $S_V$  (по данным LISST) и весовой SSC мутности показало тесное соотношение во все дни измерений. Связь между весовой мутностью SSC и объемной мутностью  $S_V$  описывается коэффициентом корреляции  $R = 0.84$ . Точки на графике “распадаются” на 3 отдельные зависимости по датам измерений (рис. 1а). Зависимости, составленные с учетом даты измерений, характеризуются более высокой корреляцией. Для 27 февраля  $SSC = 0.06 S_V + 33.5$  ( $R = 0.87$ ); для 29 марта  $SSC = 0.13 S_V + 34.7$  ( $R = 0.74$ ); для 2 апреля  $SSC = 0.07 S_V + 100.3$  ( $R = 0.87$ ). При этом выдающиеся значения с объемной концентрацией  $S_V$  от 700 до 1000 мкл/л не воспроизводятся по данным измерений оптической мутности, что позволило сделать вывод об их ошибочности. Скорее всего, возникновение таких выбросов связано с влиянием крупных частиц.

Воспроизводимость гранулометрического состава взвешенных наносов по данным высокочастотного мониторинга оказалась хуже, чем концентрации. Данные LISST-200X в среднем почти в 2 раза завышают величину крупности взвеси по сравнению с лабораторным определением крупности лазерным гранулометром (рис. 1б),

что частично объясняется включением в измеряемый диапазон крупных частиц взвеси (более 500 мкм). Характер связи между двумя величинами неоднородный. В общем случае связь между средним диаметром, определенным на лазерном гранулометре по фильтрам  $d_{50\text{фильтр}}$  и с помощью LISST-200X, определяется уравнением  $d_{50\text{фильтр}} = 0.05D + 16.9$  ( $R = 0.61$ ). Разбиение зависимости по отдельным дням не улучшает корреляцию между величинами.

Методической причиной подобных отклонений является принцип работы прибора, в котором величина объемной концентрации вещества связана с весовой концентрацией через величину плотности, и при полностью однородной взвеси (с одинаковой плотностью) зависимость весовой концентрации от объемной представляет собой прямую; однако плотность частиц разного генезиса неодинакова. Кроме этого, некоторая часть ошибки средней объемной концентрации (вычисляемой по данным о размере частиц) вносится за счет неидеальной (несферической) формы частиц (Felix et al., 2018). При этом относительные изменения состава взвеси во всех экспериментах было воспроизведено устойчиво. Следующий за этими результатами вывод о возможности использования данных LISST только для относительных оценок крупности взвеси согласуется с данными специальных лабораторных экспериментов (Lepage et al., 2019), в которых, в частности, обосновывалась необходимость корректировки данных LISST, отклоняющих результат в среднем на 79%.

Средняя крупность взвесей при измерениях составила по данным LISST-200X от 27 до 65 мкм; основную часть взвешенных наносов

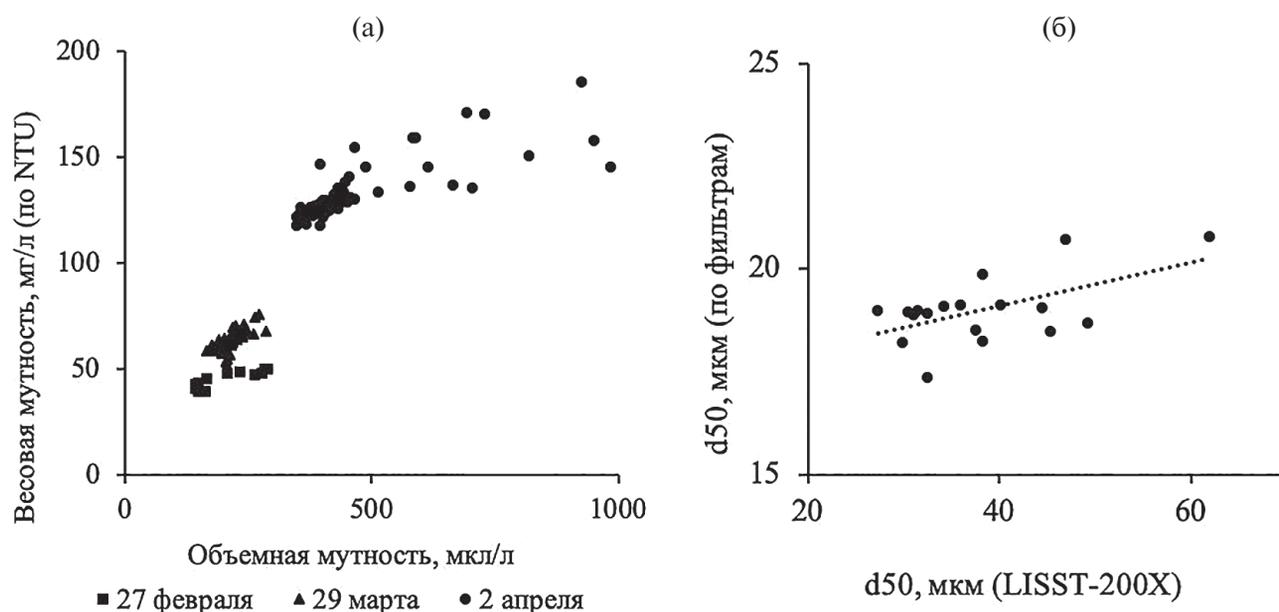


Рис. 1. Результаты сравнения измерений LISST-200X с измерениями весовой мутности (восстановленной по оптической мутности) (а) и среднего диаметра, полученного в пробах лазерным гранулометром Fritsch Analysette 22 (б).

(до 50%) составляли частицы от 10 до 50 мкм. Объемная мутность менялась в интервале от 69 до 1546 мкл/л. По мере приближения пика весеннего половодья, который в 2024 г. на р. Сетуни наблюдался 2 апреля, средний диаметр частиц и объемная концентрация увеличивались, достигнув максимальных значений в день пика. Также во время половодья в гранулометрическом составе взвешенных веществ наблюдалось существенное (до 45 раз) увеличение доли мелких частиц (1–1.48 мкм) по сравнению со значениями зимней межени.

В ходе экспериментов были выявлены 14 значимых увеличений в концентрации взвешенных частиц продолжительностью от 13 до 95 мин, сопровождавшихся изменениями крупности взвесей. Кратковременные повышения концентрации взвешенных веществ отразились и в увеличениях значений оптической мутности и фиксировались визуально. Учитывая их характер, такие прохождения мутных вод было предложено назвать плюмами. Их характеристики представлены в табл. 2.

Изменения мутности и крупности взвесей были сопоставлены с ходом дождевых осадков (метеостанция МГУ) и колебаниями водности р. Сетуни. Связь объемной концентрации с режимом осадков, уровнем и расходом воды, не выявлена. Учитывая отсутствие связи синоптических и гидрологических факторов с формированием указанных увеличений мутности, был сделан вывод об антропогенном происхождении указанных плюмов. Существование непродол-

жительных сбросов высокозагрязненных, в том числе взвесями, вод, от различных точечных источников, подтверждается многократными наблюдениям на р. Сетуни. На антропогенное происхождение указывает также кратковременность плюмов — пик достигается, в среднем, за 28 мин, а сами повышения длятся в среднем, 60 мин.

Сопоставление изменений мутности и крупности взвесей показало отрицательный гистерезисный вид связей  $D = f(S_v)$ . Во всех случаях на фоне увеличения мутности крупность взвесей  $D$  была меньше, чем на спаде мутности воды (в конце прохождения плюма). Например, 19 марта 2024 г. (рис. 2) увеличение величины  $S_v$  началось в районе 18 ч 20 мин, и достигло пика в 18 ч 50 мин, увеличившись почти в 2 раза. В это же время величина  $D$  возрастала также почти в 2 раза, однако если на подъеме мутности воды она изменялась в интервале от 60 до 90 мкм, то на спаде — от 70 до 100 мкм. В целом пик мутности соответствовал пику крупности частиц.

Гистерезис наблюдается для всех зафиксированных плюмов (рис. 3): на подъеме мутности воды отмечается меньший средний диаметр частиц, чем во время снижения при тех же концентрациях (со средней разницей от 2 до 20 мкм, в зависимости от продолжительности плюма). На рис. 3 гистерезис для значимых плюмов схематично показан черными стрелками. Такой вид связи позволил сделать вывод о распределении частиц разной крупности, поступающих от точечных источников загрязнения, по длине

**Таблица 2.** Характеристики зафиксированных плюмов мутности в р. Сетуни

Дата	Временной интервал			Средний диаметр		Объемная концентрация	
	Начало	Пик	Конец	Пик, мкм	Превышение над средним за день, раз	Пик, мкл/л	Превышение над средним за день, раз
27.02.2024	13:00	13:26	14:09	64.57	1.40	300.73	2.10
02.03.2024	10:00	10:15	10:35	54.01	1.17	153.91	1.28
	12:49	13:04	13:11	53.29	1.15	243.54	2.02
12.03.2024	15:11	15:37	16:26	60.27	1.21	143.78	1.58
	16:26	16:37	16:39	59.00	1.19	150.27	1.66
19.03.2024	18:03	18:51	19:38	100.32	1.74	519.96	2.91
	19:38	20:14	20:30	69.57	1.21	1075.37	6.03
29.03.2024	14:06	14:57	15:13	42.05	1.26	286.44	1.44
	15:13	15:23	16:22	39.23	1.17	244.94	1.23
	17:38	17:59	18:47	39.52	1.18	256.56	1.29
	18:47	19:32	20:10	43.50	1.30	241.11	1.21
02.04.2024	16:34	17:16	17:53	42.36	1.35	1124.16	2.75
	17:53	18:20	18:47	38.36	1.22	1242.78	3.04
	18:47	19:19	19:58	33.01	1.05	1375.55	3.37

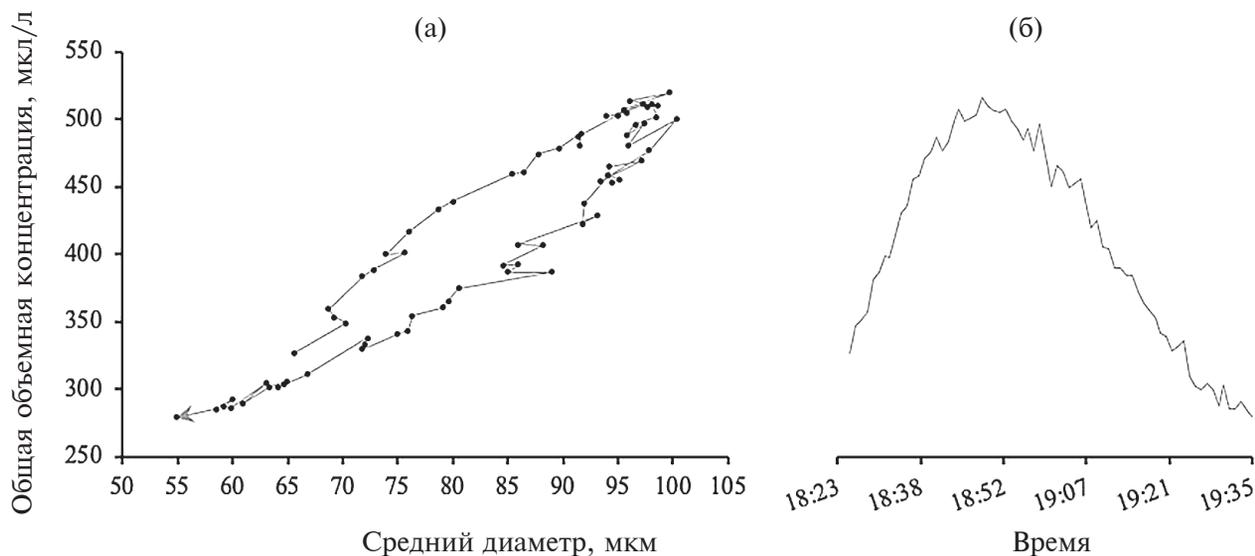


Рис. 2. Связь объемной концентрации взвеси и среднего диаметра частиц (а) и ход общей объемной концентрации (б) во время повышения 19 марта 2024 г. Данные усреднены по минутно.

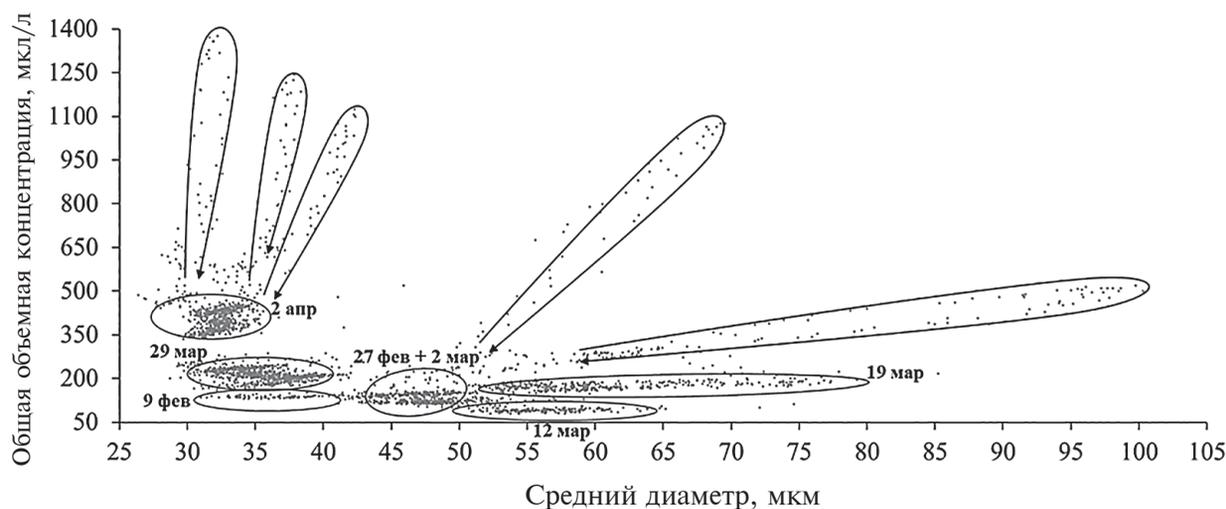


Рис. 3. Связь среднего диаметра и объемной концентрации взвешенных наночастиц в р. Сетуни, построенная на основе серий экспериментов с лазерным дифрактометром LISST в феврале–апреле 2024 г.

руслового потока. Наблюдается гидравлическая сортировка взвесей: в потоке в зоне распространения поступивших взвесей быстрее распространяются более мелкие взвеси, в то время как более крупные транспортируются в русловом потоке в тыловой части зоны повышения мутности. Это может объясняться как их большим весом, так и наоборот, наличием в потоке органических флокул, перемещаемых пульсациями и, соответственно, медленнее.

Нелинейные связи между мутностью и крупностью взвесей в пределах коротких паводков наблюдались ранее в исследованиях в швейцарских Альпах (Felix et al., 2018). В период прохождения сбросов вод с гидроузла, максимальный рост крупности взвеси соответствовал максимальной мутности воды, также как и в наших исследова-

ниях. Однако более крупные частицы транспортировались на волне подъема мутности, в то время как в р. Сетуни — на спаде. Отличия можно объяснить тем, что в условиях сбросов воды с водохранилища максимальная мощность потока и максимальное взвешивание донных частиц наблюдается в начале сбросной волны. Кроме того, в отличие от плюмов от точечных сбросов на р. Сетуни, цитируемые эксперименты проводились в непосредственной близости от источника поступления вод, что исключает возможность продольной сортировки крупности взвеси. Распределения крупности взвесей в потоке наблюдаются в плоскостных потоках (Sidorchuk, 2009), в гиперконцентрированных потоках (Чалов, Цыпленков, 2020), где более крупные частицы переносятся на гребне макровихрей.

## ВЫВОДЫ

По результатам работы получены следующие основные выводы.

1. Методы лазерной дифракции в проточных приборах LISST-200X открывают новые возможности изучения перемещения наносов в реках. Сравнение результатов его измерений с обычными методами показало высокую и очень высокую корреляцию между объемной и весовой мутностью: для отдельных дней измерений коэффициент корреляции составляет от 0.74 до 0.87. Хуже воспроизводятся значения гранулометрического состава за счет возникновения систематических отклонений, связанных с несферичностью частиц, однако все тренды и относительные изменения фиксируются достоверно.

2. Эксперименты, проведенные на р. Сетуни (Москва) в течение 7 дней в феврале–апреле 2024 г., характеризуют рост крупности взвеси при переходе от зимней межени к половодью. Основную часть взвешенных наносов (до 50%) составляли частицы 10–50 мкм.

3. На фоне этих внутрисезонных и сезонных изменений состава взвешенных наносов в р. Сетуни выявлены короткие (продолжительностью до 95 мин) увеличения мутности воды и крупности взвеси, наблюдавшиеся в разные дни. Независимость от синоптических и гидрологических (уровни и расходы воды) факторов позволила обосновать их антропогенное происхождение и классифицировать как плюмы ниже дискретных точечных сбросов загрязненных вод.

4. Выявлено, что во всех плюмах на подъеме мутности воды наблюдается меньший средний диаметр частиц, чем во время спада мутности — наблюдается так называемый эффект гистерезиса связи мутности и среднего диаметра частиц. Это явление объяснено гидравлической сортировкой взвесей: в потоке в зоне распространения поступивших взвесей быстрее распространяются более мелкие взвеси, в то время как более крупные транспортируются в русловом потоке в тыловой части зоны повышения мутности.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Полевые исследования выполнены за счет гранта РФФИ № 19-77-30004, обработка данных сетевых наблюдений — в рамках Проекта Министерства Образования и Науки Российской Федерации № 075-15-2025-008.

## FUNDING

The field research was carried out at the expense of the RSF grant no. 19-77-30004, the processing of network observation data was carried out within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation project no. 075-15-2025-008.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лопатин Г.В.* Наносы рек СССР (Образование и перенос). Географгиз, 1952.
- Чалов С.Р., Ефимов В.А.* Механический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость // Вестн. МГУ. Серия 5. География. 2021. Вып. 5. С. 91–103.
- Чалов С., Платонов В., Морейдо В., Самохин М., Ярынич Ю., Коршунова Н., Болгов М., Касимов Н.* Реакция водного стока малой городской реки на экстремальные дождевые осадки на территории Москвы в 2020 и 2021 гг. // Метеорология и Гидрология. 2023. Вып. 2. С. 69–79.  
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-2-69-79>
- Чалов С.Р., Цыпленков А.С.* Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // Вестн. Моск. ун-та. Серия 6. География. 2020. Вып. 3. С. 34–46.
- Bouchez J., Gaillardet J., France-Lanord C., Maurice L., Dutra-Maia P.* Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2011. Vol. 12. № 3. Q03008.  
<https://doi.org/10.1029/2010GC003380>
- Chalov S., Moreido V., Sharapova E., Efimova L., Efimov V., Lychagin M., Kasimov N.* Hydrodynamic Controls of Particulate Metals Partitioning Along the Lower Selenga River — Main Tributary of The Lake Baikal // *Water*. 2020. Vol. 12. № 5. 1345 p.  
<https://doi.org/10.3390/w12051345>
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M.* In-situ investigation on real-time suspended sediment measurement techniques: Turbidimetry, acoustic attenuation, laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry // *Int. J. of Sediment Res.* 2018. Vol. 33. № 1. P. 3–17.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.11.003>
- Gao J.H., Jia J., Wang Y.P., Yang Y., Li J., Bai F., Zou X., Gao S.* Variations in quantity, composition and grain size of Changjiang sediment discharging into the sea in response to human activities // *Hydrology and Earth System Sci.* 2015. Vol. 19. P. 645–655.  
<https://doi.org/10.5194/hess-19-645-2015>
- Guy P.H.* Fluvial sediment concepts / U.S. Geological Survey. 1970. Book 3. Vol. 55.
- Lupker M., France-Lanord C., Lavé J., Bouchez J., Galy V., Métivier F., Gaillardet J., Lartiges B., Mugnier J.L.* A Rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin // *J. of Geophysical Res.: Earth Surface*. 2011. Vol. 116. № F04012.  
<https://doi.org/10.1029/2010JF001947>
- Reid L.M., Dunne T.* Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology // *In Tools in Fluvial Geomorphology*. 2016. P. 357–380.  
<https://doi.org/10.1002/9781118648551.ch16>

- Sidorchuk A.Y.* High-frequency variability of aggregate transport under water erosion of well-structured soils // *Eurasian Soil Sci.* 2009. Vol. 42. № 5. P. 543–552. <https://doi.org/10.1134/s106422930905010X>
- Sokolov D.I., et al.* Impact of Mozhaysk dam on the Moscow river sediment transport // *Geography. Environment. Sustainability.* 2020. Vol. 13. № 4.
- Syvitski J.P. M., Milliman J.D.* Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean // *J. of Geology.* 2007. Vol. 115. P. 1–19.
- Szupiany R.N., Lopez Weibel C., Guerrero M., Latosinski F., Wood M., Dominguez Ruben L., Oberg K.* Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2019. Vol. 44. № 6. P. 1295–1308. doi: 10.1002/esp.4572
- Xu J.* Grain-size characteristics of suspended sediment in the Yellow River, China // *Catena.* 2000. Vol. 38. № 3. P. 243–263. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(99\)00070-3](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(99)00070-3)
- Zhao L., Boufadel M.C., King T., Robinson B., Conmy R., Lee K.* Impact of particle concentration and out-of-range sizes on the measurements of the LISST // *Measurement Science and Technology.* 2018. Vol. 29. № 5.

## Drivers and Features of Rapid Suspended Sediment Composition Changes in the Small Urban River Setun

S. R. Chalov<sup>a</sup>, O. D. Loshkov<sup>a</sup>, and E. A. Krastyn<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

\**e-mail: krastyn-e@mail.ru*

This article discusses the results of field experiments in the lower reaches of the Setun River, the largest tributary of the Moscow River within the city of Moscow, based on the LISST-200X diffractometer, which measures suspended sediment concentration (SSC) and particle size through laser diffraction. The research was conducted in early 2024, and involved high-frequency (10-second interval) long-term recordings (49 h in total) of sediment transport characteristics. The combination of these measurements with sampling for optical and gravimetric turbidity allowed for the identification of limitations in the use of such measurement tools. The reproducibility of the granulometric composition of suspended sediments based on high-frequency monitoring was found to be worse than that of their concentrations. The LISST-200X data, on average, overestimated the particle size by nearly two times compared to laboratory measurements, which can be partially explained by the inclusion of larger particles (over 500 µm) in the measured range; however, it consistently reproduced relative changes in granulometric composition. During the experiments on the Setun River, short-term (up to 95 min) increases in turbidity and particle size (plumes) were identified, likely of anthropogenic origin, characterized by hysteresis relationships between SSC and sediment composition. In all cases, during the rise in SSC, the size of suspended sediments was lower than during its decline. This result highlights a previously unexplored phenomenon of sediment transport downstream from point sources into channel flows, that shows hydraulic sorting along the river length, where lighter particles move faster than larger and heavier particles (including organic ones). The obtained estimates are significant for both monitoring anthropogenic impacts and advancing the theory of river sediments.

*Keywords:* LISST, laser diffraction, suspended sediments, sediment grain size, effluent

### REFERENCES

- Bouchez J., Gaillardet J., France-Lanord C., Maurice L., Dutra-Maia P. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2011, vol. 12, no. 3. <https://doi.org/10.1029/2010GC003380>
- Chalov S.R., Efimov V.A. Suspended sediment grain size: Classification, features and spatial variability. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2021, vol. 5, pp. 91–103. (In Russ.).
- Chalov S., Moreido V., Sharapova E., Efimova L., Efimov V., Lychagin M., Kasimov N. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga river — Main Tributary of the lake Baikal. *Water*, 2020, vol. 12, no. 5, art. 1345. <https://doi.org/10.3390/w12051345>
- Chalov S., Platonov V., Morejdo V., Samohin M., Yarynich Yu., Korshunova N., Bolgov M., Kasimov N. Small urban river runoff response to 2020 and 2021 extreme rainfalls on the territory of Moscow. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, no. 2, pp. 138–146. <https://doi.org/10.3103/s1068373923020061>
- Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Large-scale turbulence and water turbidity. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2020, vol. 3, pp. 34–46. (In Russ.).

- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. In-situ investigation on real-time suspended sediment measurement techniques: Turbidimetry, acoustic attenuation, laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry. *Int. J. Sediment Res.*, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 3–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.11.003>
- Gao J.H., Jia J., Wang Y.P., Yang Y., Li J., Bai F., Zou X., Gao S. Variations in quantity, composition and grain size of Changjiang sediment discharging into the sea in response to human activities. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2015, vol. 19, pp. 645–655. <https://doi.org/10.5194/hess-19-645-2015>
- Guy P.H. *Fluvial sediment concepts*. USGS, book 3, vol. 55, 1970.
- Lopatin G.V. *Nanosy rek SSSR (Obrazovanie i perenos) [River Sediments in USSR (Formation and transport)]*. *Geografiz*, 1952.
- Lupker M., France-Lanord C., Lavé J., Bouchez J., Galy V., Métivier F., Gaillardet J., Lartiges B., Mugnier J.L. A rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2011, vol. 116, art. F04012. <https://doi.org/10.1029/2010JF001947>
- Reid L.M., Dunne T. Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology. In *Tools in Fluvial Geomorphology*, 2016, pp. 357–380. <https://doi.org/10.1002/9781118648551.ch16>
- Sidorchuk A.Y. High-frequency variability of aggregate transport under water erosion of well-structured soils. *Eurasian Soil Sci.*, 2009, vol. 42, no. 5, pp. 543–552. <https://doi.org/10.1134/s106422930905010X>
- Sokolov D.I., et al. Impact of Mozhaysk dam on the Moscow river sediment transport. *Geogr. Environ. Sustain.*, 2020, vol. 13, no. 4.
- Syvitski J.P. M., Milliman J.D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *J. Geol.*, 2007, vol. 115, pp. 1–19.
- Szupiany R.N., Lopez Weibel C., Guerrero M., Latosinski F., Wood M., Dominguez Ruben L., Oberg K. Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2019, vol. 44, no. 6, pp. 1295–1308. <https://doi.org/10.1002/esp.4572>
- Xu J. Grain-size characteristics of suspended sediment in the Yellow River, China. *Catena*, 2000, vol. 38, no. 3, pp. 243–263. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(99\)00070-3](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(99)00070-3)
- Zhao L., Boufadel M.C., King T., Robinson B., Conmy R., Lee K. Impact of particle concentration and out-of-range sizes on the measurements of the LISST. *Meas. Sci. Technol.*, 2018, vol. 29, no. 5.