

УДК 556.013

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ТВЕРДОГО СТОКА ВОДОТОКОВ СЕВЕРО-ЗАПАДА РФ

М. В. Шмакова, С. А. Кондратьев

Институт озераведения РАН, Санкт-Петербургский ФИЦ РАН, Россия

В практике хозяйственного использования водных объектов актуальны расчеты твердого стока для различных масштабов времени – от секундного до годового. Оценка годового твердого стока, так же как и оценка статистических параметров мутности и степень ее достоверности, крайне затруднительна при нерегулярности и недостаточном освещении для разных фаз водного режима. Вместе с тем изученность процессов формирования качества природных вод и создание достаточного арсенала расчетных методов позволяют в настоящее время воспроизводить с приемлемой точностью основные показатели качества воды. Расширить возможности статистического анализа показателей качества воды позволяет комплексный подход к оценке последних посредством хорошо зарекомендовавших себя детерминированных и стохастических алгоритмов расчета с аргументами, наблюдаемыми регулярно и продолжительно. Для оценки параметров распределения расходов наносов или мутности воды в этом случае может быть использован композиционный метод, который позволяет найти параметры кривой распределения функции через параметры кривой распределения ее аргументов. В работе представлена детерминированно-стохастическая моделирующая система «погода – сток – наносы», основанная на стохастической модели погоды, модели формирования стока на водосборе и модели годового твердого стока. Система позволяет оценить параметры распределения суточных значений стока наносов и мутности воды при недостаточности данных наблюдений и в условиях изменения формирования стока на водосборе, произошедших в результате естественных причин или хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: мутность воды; расход наносов; статистика; водосбор; водоток; модель.

M. V. Shmakova, S. A. Kondratyev. SOME QUESTIONS OF ESTIMATING SUSPENDED SEDIMENT IN WATERCOURSES OF NORTH-WEST RUSSIA

In the practice of water management for economic purposes, calculations of suspended sediment for various time scales – from per-second to annual, are important. The estimation of annual suspended sediment transport, as well as of the statistical parameters of turbidity and the reliability of the estimates, is extremely difficult because of irregular and insufficient light conditions in different phases of the water regime. At the same time, owing to the knowledge of the processes that shape the quality of natural waters and a sufficient toolkit of calculation methods, the main indicators of water quality with can be reproduced with acceptable accuracy. The capabilities of statistical analysis of water quality indicators can be expanded by an integrated approach to estimating the indicators by means of well-proven deterministic and stochastic calculation algorithms with arguments observed regularly and for a long time. In this case, a composite method

can be used to estimate the parameters of the suspended sediment distribution or water turbidity, which permits finding the parameters of the distribution curve of the function from the parameters of the distribution curve of its arguments. The paper presents a deterministic-stochastic modeling system "weather-runoff-suspended sediments", based on a stochastic weather model, a model of runoff formation in a catchment area, and a model of annual suspended sediment transport. The system can estimate the distribution parameters of daily suspended sediment load and turbidity values in the situation of observed data shortage or changes in runoff formation in the catchment resulting from natural causes or economic activities.

Key words: water turbidity; sediment transport rate; statistics; catchment area; water-course; model.

Общие положения

Одним из важных показателей переменного состояния двухфазной циркуляции водных масс в водном объекте является твердый сток. Твердый сток водного объекта – это находящееся в речном потоке или движущихся массах озерных вод твердое вещество различного генезиса – грунтового (твердые минеральные частицы) или органического. Твердый сток водных объектов может рассматриваться в различных приложениях – статическом (мутность воды), динамическом (расход взвешенных и влекомых наносов, общий расход наносов) и косвенно динамическом (изменение отметок дна и переформирование берегов).

Формирование стока наносов и мутности водного объекта, как и в любом природном процессе, зависит от целого комплекса причин. Однако в зависимости от типа водного объекта источники твердого вещества и вклад той или иной составляющей этого процесса могут быть различны. Одним из основных источников наносов для водотоков и водоемов является почвенная эрозия. Интенсивность почвенной эрозии определяется физико-механическими характеристиками почвогрунтов, слагающих водосборную площадь, типом растительности, климатическими характеристиками, а также интенсивностью антропогенной деятельности на водосборе. Изменение условий формирования твердого стока на водосборе меняет вклад эрозионно-руслевой деятельности речного потока в общие процессы формирования и транспорта стока наносов.

В условиях редких и неэквидистантных наблюдений невозможно полноценно выполнить статистическую оценку вариационных рядов разного масштаба обобщения. Проблемы начинаются уже на этапе идентификации закона распределения, которому подчиняется вариационный ряд [Gumbel, 1963; Nutrients..., 2000]. Часто при статистическом анализе рядов гидрохимических показателей останавливаются

лишь на оценке медианы и межквантильного размаха [Смыжова, 2010; Лепихин, Возняк, 2012; Возняк, Лепихин, 2018]. При этом вопрос оценки экстремальных значений показателей качества воды редкой обеспеченности остается открытым. Редкость и нерегулярность наблюдений не позволяют достоверно выявить выбросы, отличающиеся от естественного (природного) генезиса. Все это приводит к смещению в параметрических и непараметрических оценках вариационного ряда. Из сказанного следует актуальность создания расчетных методов и моделей оценки характеристик мутности водных объектов при недостаточности или отсутствии данных наблюдений. Особенную важность расчеты твердого стока различных прикладных направлений приобретают в неоднократно освещенных в научной литературе условиях хозяйственной деятельности на водосборе и в пределах самого водного объекта и климатических изменений [например, Moore et al., 1989; Naidu, 1997; Kondolf et al., 2014].

Вместе с этим изученность процессов формирования качества природных вод и создание достаточного арсенала расчетных методов позволяют в настоящее время воспроизводить с приемлемой точностью основные показатели качества воды. Расширить возможности статистического анализа показателей качества воды позволяет комплексный подход к оценке последних посредством хорошо зарекомендовавших себя детерминированных и стохастических алгоритмов расчета с аргументами, наблюдаемыми регулярно и продолжительно. Для оценки параметров распределения расходов наносов или мутности воды в этом случае может быть использован композиционный метод, который позволяет найти параметры кривой распределения функции через параметры кривой распределения ее аргументов. При этом для использования композиционного метода для оценки статистических параметров мутности воды или расхода наносов необходимо располагать формулой общего расхода на-

носов, адекватно описывающей взаимосвязь расхода наносов и гидравлических характеристик потока. Причем гидравлические характеристики потока должны относиться к стандартной гидрометрической информации, характер распределения которой хорошо изучен.

Таким образом, можно выделить три основных направления в оценке стока речных наносов и мутности воды – расчеты твердого стока рек при отсутствии данных наблюдений; оценка мутности воды и расхода наносов при изменении условий формирования жидкого и твердого стока на водосборе; анализ внутригодового распределения стока наносов и мутности воды в условиях недостаточности и неэквидистантности наблюдений.

Целью настоящей работы является обзор разработанных авторами подходов к решению поставленных выше задач.

Моделирование твердого стока рек при отсутствии данных наблюдений. Притоки Ладожского озера

Литоральная зона глубоководных озер расположена на стыке двух природных комплексов – наземного и водного [Распопов, 1985] и характеризуется активными гидродинамическими процессами. Турбулентное и конвективное перемешивание водных масс исключает их устойчивость и длительную стратификацию, и это определяет физические, химические и биологические процессы литоральной зоны [Распопов, 1985]. При этом мелководная область литорали, интенсивное прогревание в вегетационный период, биогенный сток с водосборной площади формируют благоприятные условия развития процессов эвтрофирования. Для биоценозов литоральной зоны больших озер Северо-Запада определяющими факторами являются динамичность водной массы и характер донных отложений [Россолимо, 1971; Распопов, 1985]. Концентрация взвешенных веществ (или мутность воды) в литоральной зоне озера при инициации гидродинамических процессов взмучивания определяет прозрачность воды и, как следствие, проникновение света, интенсивность прогревания, а также сорбционные процессы и интенсивность фотосинтеза. Все это влияет на качество воды и жизнедеятельность водных организмов. Помимо отрицательного механического воздействия на экосистемы водных объектов взвешенные вещества выступают и в качестве источника вторичного загрязнения водоема, являясь адсорбентами высокотоксичных поллютантов [Лепихин, Головачева, 2015].

Сложно переоценить значение Ладожского озера как географического объекта и хозяйственную востребованность его водосборной площади ведущими отраслями промышленных предприятий Северо-Западного региона РФ и Финляндии. Хозяйственная освоенность водосбора Ладоги с 70-х годов прошлого столетия привела к интенсификации процессов эвтрофирования мелководных областей акватории Ладожского озера в местах впадения его основных притоков. Согласно исследованию [Ладога, 2013], большинство литоральных станций Ладожского озера имеют мезотрофный (11 станций) и эвтрофный (12 станций) трофический статус и только две станции относятся к олиготрофным. Наиболее эвтрофированная область расположена в южной части Ладожского озера, в месте впадения вод реки Волхов. Все это определяет актуальность оценки выноса твердого вещества со стоком рек в устьевые области притоков Ладожского озера.

Обширный водосбор Ладожского озера характеризуется многообразием типов подстилающей поверхности и сложной гидрографической сетью. Северная часть водосбора приходится на область распространения Балтийского кристаллического щита, сложенного гранитами и гнейсами [Ресурсы..., 1972]. Также эта часть водосбора характеризуется большим количеством озер и болот. Озера оказывают регулирующее влияние на сток наносов, осаждая последние в своей толще по причине замедленного водообмена. С юга к Балтийскому кристаллическому щиту примыкает Русская плита, сложенная глинами, известняками, песчаниками и доломитами [Ресурсы..., 1972]. Эта территория также характеризуется большим процентом заболоченных земель, но меньшей в сравнении с северной частью озерностью [Ресурсы..., 1972]. Всего на водосборе Ладожского озера выделяется четыре подбассейна – Ильмень-Волховский, Онежско-Свирский, Саймо-Вуоксинский и частный водосбор Ладожского озера [Алябина, Сорокин, 2010]. Каждый из этих водосборов имеет свои физико-географические особенности, определяющие интенсивность почвенной эрозии и условия формирования твердого стока на водосборе [Алябина, Сорокин, 2010].

Общая площадь водосбора основных притоков Ладожского озера составляет 248 232 км², что соответствует 88 % всей площади водосбора Ладожского озера (282 700 км²). Таким образом, продукты почвенной эрозии водосбора и русловых переформирований поступают в акваторию водоема преимущественно со стоком притоков.

Наблюдения за стоком наносов на притоках Ладожского озера не проводились. Исключением составляют эпизодические непродолжительные наблюдения на гидрометрических створах р. Олонка – г. Олонец (1953 и 1956 гг.) и р. Свирь – с. Мятусово (1945 и 1948 гг.), которые за основу оценки твердого стока быть приняты не могут. В этой связи для каждого притока подобраны реки-аналоги, основными критериями соответствия при подборе которых послужили уклон, крупность донных отложений и площадь водосбора (водность).

В табл. 1 приведен список гидрометрических створов основных притоков и соответствующие им аналоги и их характеристики. Для гидрометрического створа р. Олонка – г. Олонец проводились редкие наблюдения за твердым стоком, которые в основном охватывают период межени и средней водности. Для периода

большой водности для этого водотока также назначен створ-аналог.

Расчеты твердого стока и мутности воды притоков проводились по методам и моделям, разработанным в ИНОЗ РАН (аналитическая формула общего расхода наносов и стохастическая модель годового твердого стока [Шмакова, 2018]).

Модель годового твердого стока рек разработана в Институте озероведения РАН [Шмакова, 2018]. Модель стохастическая, предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой годового твердого стока и основана на композиционном методе теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов (формуле мутности воды). Композиционный метод теории вероятности позволяет оценить параметры распределения функции через параметры распределения аргументов.

Таблица 1. Основные притоки Ладожского озера и их аналоги
Table 1. The main tributaries of Lake Ladoga and their analogues

Реки и гидрометрические створы River gauging sites		Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ²		Уклон, б/р Slope		Донный грунт в створе Bottom soil	
притоки Ладожского озера tributaries	реки-аналоги rivers-analogues	приток Ладого tributaries	река-аналог rivers-analogues	приток Ладого tributaries	река-аналог rivers-analogues	приток Ладого tributaries	река-аналог rivers-analogues
Вуокса – ХГЭС Vuoksa – ХНПП	р. Мста – с. Березовский Рядок Msta – Berezovsky Ryadok	61 500	5180	0,000430	0,00066	песок, галька, валуны sand, pebbles, boulders	галька pebbles
Янисйоки – п. Хямекоски Janisjoki – Hamekoski	р. Мста – с. Березовский Рядок Msta – Berezovsky Ryadok	3650	5180	0,00065	0,00066	камни, галька stones, pebbles	галька pebbles
Видлица – с. Б. Горы Vidlitsa – B. Mountains	р. Паша – с. Часовенское Pasha – Chasovenskoe	977	5710	0,001087	0,0009	песок sand	песок sand
Олонка – г. Олонец Olonka – Olonets	р. Мга – д. Горы Mga – Mountain village	2120	709	0,00076	0,00061	песок, валуны sand, boulders	песок, галька sand, pebbles
Свирь – XII ГЭС Svir – XII НПП	р. Нева – г. Петрокрепость Neva – Petrokrepost'	67 100	–	0,000134	0,0005	песок, ил sand, silt	песок, камни sand, stones
Сясь – д. Яхново Syas – Yakhново	р. Оять – д. Шангиничи Oyat – Shanginichi	6230	4930	0,00093	0,00097	песок, валуны sand, boulders	песок sand
Волхов – VI ГЭС Volkhov – VI НПП	р. Нева – г. Петрокрепость Neva – Petrokrepost'	79 800	–	0,0000625	0,0005	песок, гравий, валуны sand, gravel, boulders	песок, камни sand, stones

Аргументами модели являются расход воды и средняя глубина потока, функцией – расход наносов.

Всего для каждого водотока были сгенерированы ряды значений суточного расхода воды продолжительностью 100 лет, которые пересчитывались в ряды значений расхода наносов и мутности воды. В качестве количественных ориентиров при расчетах мутности воды приняты данные наблюдений за мутностью воды на исследуемых водотоках, проводившихся сотрудниками Института озероведения РАН в период 2011–2019 гг. [Разработка..., 2018].

Согласно результатам вычислений годового твердого стока, с основными притоками (с 88 % водосборной площади Ладожского озера) в Ладогу поступает около 380 тыс. тонн речных наносов в год. Если привести рассчитанное значение к общей площади водосбора Ладоги, то получится, что за год в озеро поступает 432 тыс. т. При этом сток наносов может быть несколько завышенным ввиду того, что в его расчет включены продукты не только склоновой, но и русловой эрозии основных притоков Ладожского озера. Основной вклад в поступление наносов в акваторию Ладожского озера осуществляют водотоки с наибольшей водностью – Свирь, Вуокса и Волхов. Однако на эти же водотоки приходится и наименьший годовой модуль твердого стока, что объясняется удержанием наносов зонами подпора перед плотинами ГЭС на этих реках и, как следствие, уменьшением общего расхода наносов.

Моделирование мутности воды при численной реализации климатических прогнозов. Река Нарва

В качестве примера практической реализации композиционного метода в приложении к оценке параметров распределения мутности воды может служить детерминированно-стохастическая система «погода – сток – наносы» [Кондратьев, Шмакова, 2019], разработанная в Институте озероведения РАН и представленная следующим комплексом моделей: стохастическая модель погоды, модель формирования стока на водосборе, стохастическая модель годового твердого стока. Сток наносов в гидрометрическом створе р. Нарва – д. Скамья зарегулирован Чудским озером, которое выступает в роли отстойника взвешенных минеральных частиц, поступающих с водосбора и со стоком притоков. Незначительная мутность воды реки Нарвы в исследуемом створе и ее внутригодовое распределение в основном обусловлены почвенно-эрозионными процес-

сами частного водосбора. Ниже по течению небольшая мутность воды реки Нарвы определяется влиянием Нарвского водохранилища, также выступающего в роли отстойника взвешенных веществ. Для последующего анализа в работе использовались данные наблюдений за расходом воды и мутностью, проведенных в период с 2004 по 2017 год [Bobrovitskaya, Kokorev, 2004].

Ввиду большой водохозяйственной востребованности реки Нарвы актуальность приобретает численный эксперимент по оценке параметров распределения мутности в условиях возможного изменения климата. В качестве примера климатического сценария был принят сценарий ЕСНАМ А2 [Карлин, 2010], разработанный для Балтийского региона. Региональные изменения климата в этом сценарии представлены как «вырезка» региона из глобального прогноза, полученного по моделям общей циркуляции атмосферы и океана. Прогностический период охватывает 2009–2099 гг. Вырезка осуществлена для расчетов по сценарию А2 (максимальная эмиссия CO₂ в атмосферу). Предполагается рост средней годовой температуры воздуха за 100 лет на 6 °С, а рост средних годовых атмосферных осадков за 100 лет на 0,39 мм/сут.

На первом этапе моделирования проведена оценка параметров распределения суточных значений температуры воздуха и слоев осадков для метеостанции г. Псков в период с 1980 по 2010 г. Далее параметры распределения этих рядов были откорректированы с учетом климатического прогноза и сгенерированы ряды с прогнозными значениями метеорологических элементов продолжительностью 100 лет. Эти ряды обеспечили вход в модель формирования стока согласно схеме детерминированно-стохастической моделирующей системы. Параметры распределения расходов воды легли в основу генерирования рядов мутности воды. В табл. 2 приведены параметры распределения суточных расходов воды и мутности, рассчитанных соответственно по модели формирования стока и модели годового твердого стока. Согласно полученным результатам, изменение климата приведет к уменьшению стока и увеличению мутности воды. Тенденция увеличения мутности с уменьшением расхода воды выражена для данных наблюдений в расчетном створе и обеспечивается обратной связью мутности воды и средней глубины потока. При численной реализации сценария ЕСНАМ А2 среднее значение мутности в расчетном створе увеличится на 79 %, а медианные значения – на 124 %.

Таблица 2. Параметры распределения наблюдаемых и сгенерированных рядов (прогноз ECHAM A2) расхода воды и мутности, р. Нарва

Table 2. Distribution parameters of the observed and simulated series (ECHAM A2 forecast) of water flow and turbidity, Narva River

	X_{cp} X_{av}	C_v	M	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{25\%} - X_{75\%}$
Расход воды наблюдаемый, м ³ /с Observed water flow, m ³ /s	312	0,35	308	376	234	142
Расход воды смоделированный, м ³ /с (прогноз ECHAM A2) Simulated water flow, m ³ /s (ECHAM A2 forecast)	160	0,26	157	186	130	56
Мутность воды наблюдаемая, г/м ³ Observed water turbidity, g/m ³	5,33	0,99	3,90	6,24	2,14	4,10
Мутность воды смоделированная, г/м ³ (прогноз ECHAM A2) Simulated water turbidity, g/m ³ (ECHAM A2 forecast)	9,53	0,64	8,73	13,6	4,68	8,92

Примечание. X_{cp} – среднее; C_v – коэффициент вариации; M – медиана; $X_{25\%}$ и $X_{75\%}$ – квантили вероятностью 25 и 75 %.

Note. X_{av} – mean; C_v – coefficient of variation; M – median; $X_{25\%}$ and $X_{75\%}$ – quantiles with probability of 25 and 75 %.

Оценка внутригодового распределения расхода наносов. Реки Северо-Запада РФ

Наблюдения за расходом наносов и мутностью воды на реках Северо-Запада проводились относительно регулярно и продолжительно лишь на девяти водотоках, охватывая период со второй половины прошлого века по настоящее время. В табл. 3 приведен список гидрометрических створов с продолжительными данными наблюдений за твердым стоком и указанием бассейновой принадлежности представленных водотоков. Анализ внутригодового распределения твердого стока исследуемых водотоков, перечень которых представлен в табл. 3, проводился на основании данных изданий ОГХ и гидрологических ежегодников за разные годы.

В табл. 3 приведены средние значения годового модуля твердого стока $M_{год}$, т/(км²·год), рассчитанного за период с 1991 года по настоящее время для расчетных створов. Наибольшие значения этой величины (7,4–8,4 т/(км²·год)) приходятся на водосборы рек Пскова, Мста и Оять. Сравнительно небольшая площадь водосбора р. Пскова (менее 1000 км²) предполагает преимущественный вклад в формирование стока наносов склоновой эрозии, что и определяет достаточно высокие значения годового модуля твердого стока [Ресурсы..., 1972]. На берегах рек Оять и Мста много обнажений песчаников и глин, которые со склоновым стоком в благоприятные для этого периоды формируют повышенные концентрации наносов. Наименьшее значение (ниже 0,5 т/(км²·год)) приходится на частично закарстованный водосбор реки Луги. Для остальных шести исследуемых водотоков годового модуль твердого стока находится в пределах 3,2–6,5 т/(км²·год), что в целом характерно для рек этого региона [Ресурсы..., 1972].

двух водотоков годового модуль твердого стока находится в пределах 3,2–6,5 т/(км²·год), что в целом характерно для рек этого региона [Ресурсы..., 1972].

Внутригодовое распределение

Известную сложность при построении обобщенного внутригодового хода величин, характеризующих гидрологический режим (например, уровня и расхода воды, расхода наносов, мутности воды), является проблема осреднения таковых. В итоге подобные построения претерпевают многолетнее сглаживание, купируют характерные максимумы и, как следствие, не отражают истинного положения дел.

При этом основные методы математической статистики – оценка параметров распределения, проверка статистических гипотез, дисперсионный анализ – применяются в предположении, что распределение генеральной совокупности известно. Однако нередко встречаются величины (показатели качества воды, расход наносов, мутность воды), для которых эти предположения не выполняются. В таких случаях обращаются к непараметрическим методам, т. е. методам, не зависящим от распределения генеральной совокупности. Непараметрические методы применяются для качественных величин, представленных в номинальной шкале, величин, измеряемых в порядковой шкале (т. е. представленных в виде рангов), а также количественных величин в том случае, когда распределение генеральной совокупности нельзя определить, так как выборка мала, либо когда распределение не следует нормальному закону и параметрические методы неприменимы.

Таблица 3. Реки с продолжительными наблюдениями за стоком наносов

Table 3. Rivers with long-term observations of sediment runoff

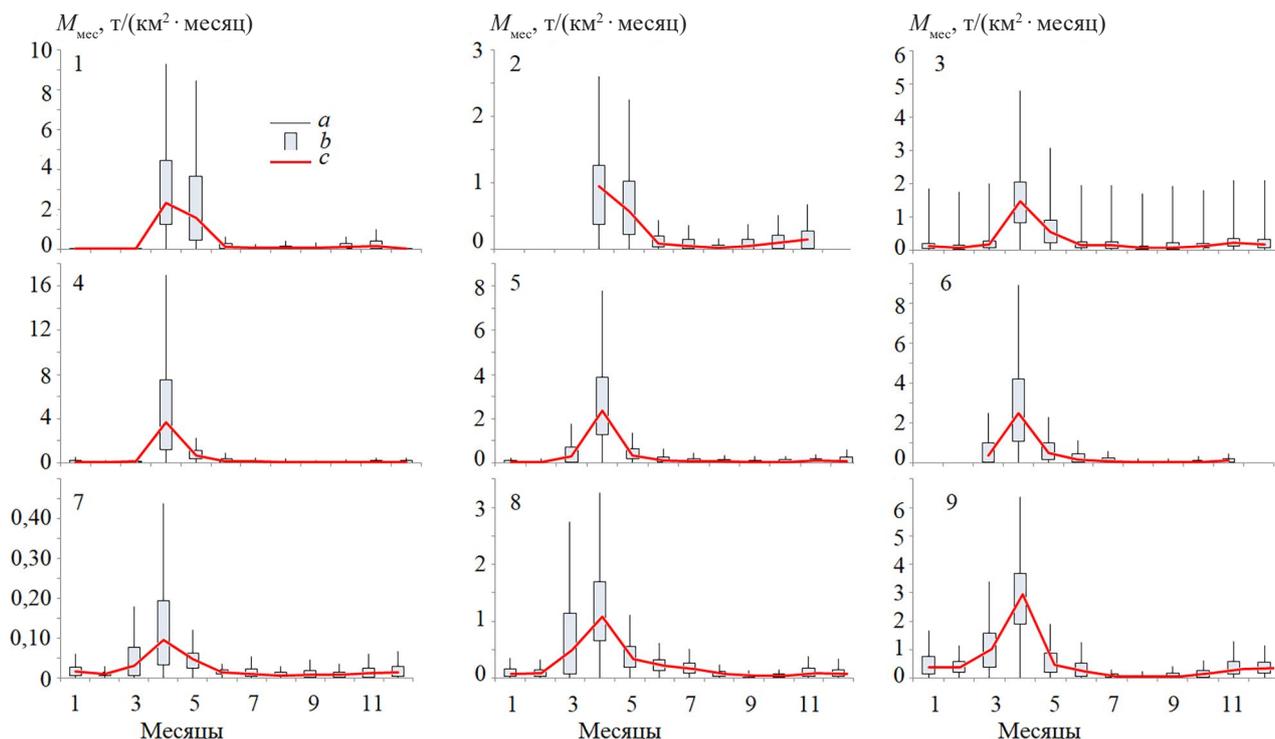
№ г/м створа N	Река River	Створ Target range	F, км ² F, km ²	Уклон, б/р Slope	Период наблюдений, принятый для расчета, годы Observation period used for calculation	$M_{год}$ т/(км ² ·год) M_{year} t/(km ² ·year)
Частный бассейн Ладожского озера Private catchment area of Lake Ladoga						
Притоки р. Свирь Tributaries of the Svir River						
1	Паша Pasha	с. Часовенское Chasovensкое	5710	0,00090	1961–2010	2,1
2	Оять Oyat	д. Акулова Гора Aculova Gora	4830	0,00097	1961–2017	7,4
Приток р. Сясь Tributary of the Syas River						
3	Тихвинка Tihvinka	д. Горелуха Goreluha	2070	0,00113	1981–2017	3,9
Бассейн оз. Ильмень Catchment of Lake Ilmen						
Впадает в оз. Ильмень It flows into Lake Ilmen						
4	Пола Pola	д. Налючи Naluchi	6450	0,00122	1974–2017	5,2
5	Мста Msta	д. Девкино Devkino	22500	0,00049	1961–2017	7,3
6	Ловать Lovat	г. Холм Kholm	14700	0,00038	1976–2017	4,1
Приток р. Ловать Tributary of the Lovat River						
7	Полисть Polist	д. Утушкино Utushkino	1450	0,00059	1975–2017	4,5
Впадает в Финский залив It flows into the Gulf of Finland						
8	Луга Luga	г. Луга Luga	2330	0,00018	1978–2017	0,41
Впадает в Чудско-Псковское озеро It flows into Lake Peipus-Pskov						
9	Пскова Pskova	д. Черняковицы Chernyakovitsy	914	0,00142	1974–2009	8,4

Анализ литературных источников показывает, что для изучения состояния различных природных сред и гидрохимических показателей в качестве оценки центра распределения, в частности, рекомендуется использовать медиану и трехсреднее значение Тьюки (центральное среднее), а в качестве оценки масштаба распределения – интерквартильный размах и медиану абсолютных отклонений [Tukey, 1977; McGill et al., 1978]. Причем исследования показали, что при длине ряда $n < 5$ лучше использовать медиану, а при $n > 5$ – трехсреднее значение [Tukey, 1977; McGill et al., 1978].

Наиболее удобным инструментом анализа внутригодового распределения месячных модулей твердого стока представляется квартильная диаграмма, которая, с одной стороны,

помогает избежать сглаживания при осреднении среднемесячных значений, а с другой – наглядно показывает изменчивость исследуемой величины в пределах рассматриваемой выборки, степень асимметрии и форму ее распределения [ГОСТ..., 2017]. На рисунке приведены квартильные диаграммы внутригодового распределения месячных модулей твердого стока, совмещенные с линией трехсредних значений этой величины. В данном построении (рис.) рассматривается 1,5-интерквартильный размах IQR, за пределами которого данные наблюдений рассматривают как возможные выбросы [ГОСТ..., 2017].

Распределение стока наносов в течение года определяется режимом стока реки. Максимальные значения месячных модулей твердого



Квартильная диаграмма внутригодового распределения месячных модулей твердого стока исследуемых водотоков $M_{мес}$, т/(км²·месяц), построенная для периода с 1991 г. по настоящее время (a – ящики, построенные для диапазона $[M_{мес25\%}; M_{мес75\%}]$; b – усы, построенные для диапазонов $[M_{мес25\%}; M_{мес25\%} - 1,5 IQR]$ и $[M_{мес75\%}; M_{мес75\%} + 1,5 IQR]$; c – трехсреднее значение):

1 – р. Оять – д. Акулова Гора; 2 – р. Паша – д. Часовенское; 3 – р. Тихвинка – д. Горелуха; 4 – р. Мста – д. Девкино; 5 – р. Пола – д. Налучи; 6 – р. Ловать – г. Холм; 7 – р. Луга – г. Луга; 8 – р. Полисть – с. Утушкино; 9 – р. Пскова – д. Черняковицы

Quartile diagram of the intra-annual distribution of monthly solid flow modules of the studied watercourses M_{month} , т/(км²·month), built for the period from 1991 up to the present (a – boxes built for the range $[M_{month 25\%}; M_{month 75\%}]$; b – whiskers built for the ranges $[M_{month 25\%}; M_{month 25\%} - 1.5 IQR]$ and $[M_{month 75\%}; M_{month 75\%} + 1.5 IQR]$; c – three-average value):

1 – r. Oyat – Akulova Gora; 2 – r. Pasha – Chasovenskoie; 3 – r. Tikhvinka – Goreluha; 4 – r. Msta – Devkin; 5 – r. Pola – Naluchi; 6 – r. Lovat – Kholm; 7 – r. Luga – Luga; 8 – r. Polist – Utushkino; 9 – r. Pskov – Chernyakovitsy

стока всех исследуемых водотоков приходится на половодье в марте–мае, как правило, достигая пика в апреле, что характерно для Северо-Западного региона. Причем прохождение максимумов в северных реках (Паша, Оять и Тихвинка) в основном приходится на апрель–май; в реках, протекающих в южной части региона, – на март–апрель. Минимальные значения годового модуля стока в меженный период крайне невелики, особенно зимой, и для отдельных лет близки к нулю. Представленные на рисунке диаграммы хорошо иллюстрируют заметную асимметрию месячных значений модуля в сторону больших. Для всех расчетных гидрометрических створов, кроме р. Тихвинка – д. Горелуха, наиболее выраженная асимметрия приходится на месяцы с повышенным стоком наносов. Для створа р. Тихвинка – д. Горелуха большие диапазоны исследуемой величины наблюдаются

в течение всего года. Бассейн р. Тихвинка, расположенный в северной части Валдайской возвышенности, представлен сложноразмываемыми тяжелосуглинистыми разновидностями почв [Схема..., 2010], и основная доля наносов формируется в результате русловой эрозии. Это объясняет относительно равномерную интенсивность последней в течение года.

Таким образом, внутригодовое распределение твердого стока исследуемых водотоков характеризуется крайне небольшими значениями в меженный период и многократно превышающими их значениями твердого стока в период большой воды. Последнее вполне объяснимо существенным вкладом в формирование твердого стока водотоков почвенной эрозии, наиболее интенсивные процессы которой приходятся на период активного снеготаяния и паводков.

Заключение

Многообразие водных объектов по их различной физико-географической принадлежности, морфометрическим и гидравлическим характеристикам, особенностям водосборных площадей и климатическим факторам предполагает и определенные особенности охраны и рационального водохозяйственного использования таковых. Дефицит данных наблюдений за твердым стоком при известной востребованности расчетов, сопряженных с различными характеристиками твердого стока (интенсивность заиления водохранилищ, статистические параметры распределения мутности воды, поля распределения мутности в акватории, динамика переформирования дна водного объекта и многие другие), определил актуальность разработки соответствующих методов оценки твердого стока в различных приложениях.

Представленные в данной работе подходы к оценке твердого стока в разных приложениях достаточно актуальны, поскольку существующая в настоящее время сеть наблюдений за расходами наносов и показателями качества воды и система проведения наблюдений на отдельных водных объектах не могут в полной мере обеспечить достоверный для последующей обработки и анализа материал и не предоставляют возможности полноценно проработать вопрос статистической оценки вариационных рядов суточных значений мутности воды. При этом развитие детерминированно-стохастических методов оценки твердого вещества в водном объекте предполагает наличие надежных детерминированных расчетных схем, достоверно описывающих физику процессов массопереноса, что и обеспечивается разработанным комплексом моделей и методов оценки расхода наносов и мутности воды, в том числе и при отсутствии и недостаточности данных наблюдений.

Авторы работы выражают глубокую благодарность руководителю Отдела мониторинга поверхностных вод и экспедиционных исследований ГГИ Нелле Николаевне Бобровицкой и заведующей лабораторией наносов ГГИ Татьяне Валерьевне Турутиной за любезно предоставленные данные по реке Нарва.

Работа выполнена при финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета в рамках темы № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Литература

Алябина Г. А., Сорокин И. Н. Бассейн Ладожского озера как источник воздействия на экологическое состояние озера // Региональная экология. 2010. № 4(30). С. 27–35.

Возняк А. А., Лепихин А. П. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример // Географический вестник. 2018. № 2(45). С. 103–115.

ГОСТ ИСО 16269-4-2017. Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов. М.: Стандартинформ, 2017. 53 с.

Карлин Л. Н. Прогностические оценки влияния изменения климата на экологическое состояние Балтийского моря: Отчет по проекту РФФИ № 09-05-13553. 2010.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.

Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.

Лепихин А. П., Возняк А. А. Исследование статистических функций распределения гидрохимических показателей качества воды поверхностных водных объектов // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. 2012. № 4. С. 21–32.

Лепихин А. П., Головачева С. И. К проблеме регламентации отведения взвешенных веществ в естественные водотоки // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 4–13.

Разработка и совершенствование научных, технических, методических и правовых основ с целью сохранения Ладожского озера как геостратегического объекта питьевого водоснабжения федерального значения на основе комплексных исследований: Отчет о НИР по теме Плана НИР ИНОЗ РАН на 2013–2019 гг. № 0154-2014-0003 (закл.) / ИНОЗ РАН; рук. В. А. Румянцев, Ш. Р. Поздняков. СПб., 2018. Ч. 1. 199 с. № ГР 01201363379.

Распопов И. М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 188 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Карелия и Северо-Запад. Т. 2, ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 528 с.

Россолимо Л. П. Проблема антропогенного эвтрофирования озер и пути ее решения // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1971. Т. 1. С. 35–45.

Смыжова Е. С. Оценка стока биогенных веществ с учетом особенностей гидрохимической информации (на примере реки Великой): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2010. 27 с.

Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна реки Нева. Кн. 1. Общая характеристика речного бассейна реки Нева / Мин. природных ресурсов и экологии РФ. СПб., 2010 г. 189 с.

Шмакова М. В. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ. СПб.: ВВМ, 2018. 149 с.

Bobrovitskaya N. N., Kokorev A. V. Development of transboundary surface water monitoring system

// XXIII Nordic Hydrol. Conf., Tallinn, Estonia 8–12 August 2004, Selected articles / Ed. Arvo Jarvet. Vol. 11, NHP Report No. 48. Tartu, 2004. P. 415–423.

Gumbel E. J. Statistical forecast of droughts // IAHS Bull. 1963. Vol. 8, no. 1. P. 5–23.

Kondolf G. M., Rubin Z. K., Minear J. T. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation // Wat. Resour. Res. 2014. Vol. 50, iss. 6. P. 5158–5169.

McGill R., Tukey J. W., Larsen W. A. Variations of Box Plots // The American Statistician. 1978. Vol. 32, no. 1. P. 12–16.

Moore J. N., Brook E. J., Johns C. Grain size partitioning of metals in contaminated coarse-grained river

flood plain sediment, Clark Fork River // Montana. Environ. Geol. Wat. Sci. 1989. No. 14. P. 107–115.

Naidu B. S. K. Addressing the problems of silt erosion at hydro plants // Hydropower and Dams. 1997. No. 4, iss. 3. P. 72–77.

Tukey J. W. Exploratory Data Analysis. Reading MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1977.

Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs / US Environ. Protection Agency. Washington, DC. EPA-822-B00-001. 2000.

Поступила в редакцию 25.02.2021

References

Alyabina G. A., Sorokin I. N. Bassein Ladozhskogo ozera kak istochnik vozdeistviya na ekologicheskoe sostoyanie ozera [Lake Ladoga basin as a source of impact on the ecological state of the lake]. *Regional'naya ekol.* [Regional Ecol.]. 2010. No. 4(30). P. 27–35.

Voznyak A. A., Lepikhin A. P. Razrabotka regional'nykh PDK: neobkhodimost', metodika, primer [Development of regional MPC: necessity, methodology, and an example]. *Geograficheskii vestnik* [Geographical Bull.]. 2018. No. 2(45). P. 103–115.

GOST R ISO 16269-4-2017. *Statisticheskie metody. Statisticheskoe predstavlenie dannykh. Chast' 4. Vyyavlenie i obrabotka vybrosov* [Statistical methods. Statistical representation of data. Part 4. Identification and treatment of emissions]. Moscow: Standartinform, 2017. 53 p.

Karlin L. N. Prognosticheskie otsenki vliyaniya izmeneniya klimata na ekologicheskoe sostoyanie Baltiiskogo morya [Predictive assessments of the impact of climate change on the ecological state of the Baltic Sea]: Otchet po projektu RFFI № 09-05-13553. 2010.

Kondratiev S. A., Shmakova M. V. Matematicheskoe modelirovanie massopereenos v sisteme vodosbor – vodotok – vodoem [Mathematical modeling of mass transfer in the catchment – watercourse – water body system]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2019. 246 p.

Ladoga. Eds. V. A. Rummyantsev, S. A. Kondrat'ev. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013. 468 p.

Lepikhin A. P., Voznyak A. A. Issledovanie statisticheskikh funktsii raspredeleniya gidrokhimicheskikh pokazatelei kachestva vody poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov [Investigation of statistical distribution functions of hydrochemical indicators of water quality of surface water bodies]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii. Problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Management in Russia. Problems, Technologies, and Management]. 2012. No. 4. P. 21–32.

Lepikhin A. P., Golovacheva S. I. K probleme reglamentatsii otvedeniya vzveshennykh veshchestv v estestvennyye vodotoki [On the problem of regulating the discharge of suspended substances into natural watercourses]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii. Problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Management in Russia. Problems, Technologies, and Management]. 2015. No. 1. P. 4–13.

Razrabotka i sovershenstvovanie nauchnykh, tekhnicheskikh, metodicheskikh i pravovykh osnov s tsel'yu

sokhraneniya Ladozhskogo ozera kak geostrategicheskogo ob'ekta pit'evogo vodosnabzheniya federal'nogo znacheniya na osnove kompleksnykh issledovaniy [Development and improvement of scientific, technical, methodological and legal bases for the preservation of Lake Ladoga as a geostrategic object of drinking water supply of federal significance on the basis of comprehensive research]: R&D report on the topic of the R&D Plan of INOZ RAS for 2013–2019. No. 0154-2014-0003 (final). St. Petersburg, 2018. Part 1. 199 p. N GR 01201363379.

Raspopov I. M. Vysshaya vodnaya rastitel'nost' bol'shikh ozer Severo-Zapada SSSR [The highest aquatic vegetation of the great lakes of the North-West of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1985. 188 p.

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Kareliya i Severo-Zapad [Surface water resources of the USSR. Karelia and the North-West]. Vol. 2. Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 528 p.

Rossolimo L. P. Problema antropogennogo evtrofirovaniya ozer i puti ee resheniya [The problem of anthropogenic eutrophication of lakes and ways to solve it]. *Izv. AN SSSR. Ser. geogr.* [Proceed. AS USSR. Ser.: Geography]. 1971. Vol. 1. P. 35–45.

Smyzhova E. S. Otsenka stoka biogennykh veshchestv s uchetom osobennostei gidrokhimicheskoi informatsii (na primere reki Velikoi) [Assessment of the nutrient runoff taking into account the peculiarities of hydrochemical information (on the example of the Velikaya River)]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Petersburg, 2010. 27 p.

Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i okhrany vodnykh ob'ektov (SKIOVO) basseina reki Neva. Kniga 1. Obshchaya kharakteristika rechnogo basseina reki Neva. Min. prirodnykh resursov i ekologii RF [Scheme of complex use and protection of water objects (the plan) in the basin of the Neva River. Book 1. General characteristics of the Neva River basin Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation]. St. Petersburg, 2010. 189 p.

Shmakova M. V. Raschety tverdogo stoka rek i zaileniya vodokhranilishch [Calculations of solid river flow and reservoir siltation]. St. Petersburg: VVM, 2018. 149 p.

Bobrovitskaya N. N., Kokorev A. V. Development of transboundary surface water monitoring system. XXIII Nordic Hydrol. Conf., Tallinn, Estonia 8–12 August 2004, Selected articles. Ed. Arvo Jarvet. Vol. 11, NHP Report No. 48. Tartu, 2004. P. 415–423.

Gumbel E. J. Statistical forecast of droughts. *IAHS Bull.* 1963. Vol. 8, no. 1. P. 5–23.

Kondolf G. M., Rubin Z. K., Minear J. T. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Wat. Resour. Res.* 2014. Vol. 50, iss. 6. P. 5158–5169.

McGill R., Tukey J. W., Larsen W. A. Variations of Box Plots. *The American Statistician.* 1978. Vol. 32, no. 1. P. 12–16.

Moore J. N., Brook E. J., Johns C. Grain size partitioning of metals in contaminated coarse-grained river flood plain sediment, Clark Fork River. *Montana. Environ. Geol. Wat. Sci.* 1989. No. 14. P. 107–115.

Naidu B. S. K. Addressing the problems of silt erosion at hydro plants. *Hydropower and Dams.* 1997. No. 4, iss. 3. P. 72–77.

Tukey J. W. Exploratory Data Analysis. Reading MA: Addison-Wesley Publ. Co., 1977.

Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs. US Environ. Protection Agency. Washington, DC. EPA-822-B00–001. 2000.

Received February 25, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шмакова Марина Валентиновна

ведущий научный сотрудник, д. г. н.
Институт озераведения РАН – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН»
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: m-shmakova@yandex.ru
тел.: +79052626251

Кондратьев Сергей Алексеевич

зам. директора по науке, д. ф.-м. н.
Институт озераведения РАН – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН»
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: kondratyev@limno.org.ru
тел.: +79213718470

CONTRIBUTORS:

Shmakova, Marina

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanova, 196105, St. Petersburg, Russia
e-mail: m-shmakova@yandex.ru
tel.: +79052626251

Kondratyev, Sergey

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanova, 196105, St. Petersburg, Russia
e-mail: kondratyev@limno.org.ru
tel.: +7 (921) 3718470