

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МУТНОСТИ ВОДЫ В ВОДОТОКАХ

М.В. Шмакова¹, С.А. Кондратьев²

^{1,2} Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Институт озероведения, лаборатория математических методов моделирования

¹ Введ. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

² Глав. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: 3718470@gmail.com

В практике хозяйственного использования водных объектов актуальны расчеты твердого стока различных масштабов – от секундного до годового. Оценка годового твердого стока и степень ее достоверности, так же как и оценка статистических параметров мутности воды, крайне затруднительны при нерегулярности и недостаточном освещении для разных фаз водного режима. 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. В работе представлена детерминировано-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. Практическая реализация моделирующей системы на примере реки Нарва показала хорошее соответствие между параметрами распределения наблюдаемых и рассчитанных рядов суточных значений мутности воды. Представленная численная реализация климатического прогноза показала, что уменьшение стока реки, вызванное ростом температуры воздуха, приведет к значительному увеличению мутности воды.

Ключевые слова: мутность воды, моделирование, водоток, параметры распределения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.4

ВВЕДЕНИЕ

Мутность водного объекта определяется геоморфологическими характеристиками водосбора, условиями формирования стока на водосборе, водностью самого объекта, климатическими факторами, а также хозяйственной деятельностью [Алексеевский, 1998]. Режим формирования мутности отличается высокой степенью изменчивости ее значений в течение года. Существующая в настоящее время сеть наблюдений государственного мониторинга за показателями качества воды не может в полной мере обеспечить получение достаточного количества данных натурных наблюдений для их последующей обработки и анализа. Пробы отбираются редко и нерегулярно, количество наблюдательных пунктов ограничено. Так, в наблюдательной сети Северо-Западного УГМС Росгидромета измерения мутности воды в настоящее время регулярно проводятся лишь на шести

гидрологических постах [Автоматизированная..., 2020].

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; US EPA, 2000]. Часто при статистическом анализе рядов гидрохимических показателей останавливаются лишь на оценке медианы и межквантильного размаха [Возняк, Лепихин, 2018; Лепихин, Возняк, 2012; Смыжова, 2010]. 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 воды 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 [Moore et al., 1989; Naidu, 1997; Гельфан, 2007; Kondolf et al., 2014; Ailliot et al., 2015].

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 [Крамер, 1975]. Средствами решения такого рода задач могут служить ДС моделирую-

щие системы, включающие блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов в качестве входа в последующие детерминированные блоки системы. Пространственно-временная динамика, корреляционные структуры, относительная климатическая устойчивость и естественная метеорологическая изменчивость привели к большому разнообразию так называемых стохастических генераторов погоды [Bailey, 1964; Jones et al., 1972; Nick, Harp, 1980; Larsen, Pense, 1982; Виноградов, 1988; Racsco et al., 1991]. В качестве детерминированного блока необходимо при этом располагать алгоритмами оценки стока на водосборе и формулой общего расхода наносов, адекватно описывающей взаимосвязь расхода наносов и гидравлических характеристик потока, причем гидравлические характеристики потока должны относиться к стандартной гидрометрической информации, характер распределения которой хорошо изучен.

В качестве примера практической реализации композиционного метода в приложении к оценке параметров распределения мутности воды может служить детерминировано-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, модель годового твердого стока (рис. 1).

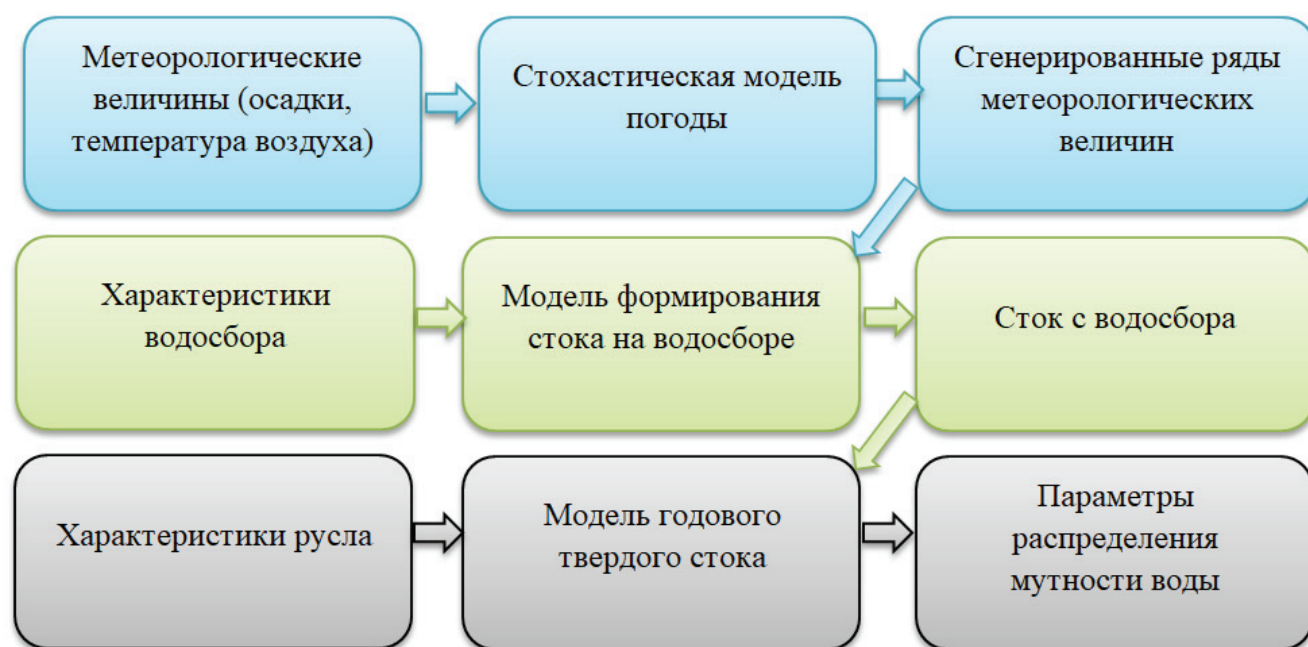


Рис. 1. Схема ДС моделирующей системы «погода – сток – наносы»

Fig. 1. Diagram of the DS modeling system “weather – runoff – sediment”

Целью настоящего исследования является оценка текущего и прогнозного статистического распределения мутности воды в речном потоке на основе детерминировано-стохастической (ДС) моделирующей системы «погода – сток – наносы». Объектом исследования послужила река Нарва, соединяющая Чудское озеро и Финский залив Балтийского моря.

Объект исследования. Река Нарва вытекает из Чудского озера и впадает в Финский залив. Длина реки составляет 77 км, площадь водосбора 56 200 км² (на территории РФ 39 000 км²). Средний уклон реки – 0,39‰. Река по полноводности занимает второе место среди рек, впадающих в Финский залив. Нарва – очень порожистая река, дважды прорезает известняки. В 1955–1956 гг. на участке 18,2–61,0 км в нижнем течении реки было создано Нарвское водохранилище. Таким образом, сток р. Нарвы зарегулирован в верхнем течении Чудско-Псковским озером, в нижнем – Нарвским водохранилищем, устьевой участок реки находится под влиянием Финского залива. Пост р. Нарвы – д. Скамья расположен в 0,55 км ниже истока р. Нарвы из Чудского озера. Прилегающая к посту местность представляет собой низменную равнину, местами заболоченную, занятую у реки под луга и огороды, далее – лесом. Русло прямолинейное, песчано-гравелистое. Река имеет большое водохозяйственное значение как для России, так и для Эстонии и используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения, судоходства и выработки элек-

троэнергии (ГЭС Нарва) [Bobrovitskaya et al., 2003; Bobrovitskaya, Kokorev, 2004].

Сток наносов в гидрометрическом створе р. Нарвы – д. Скамья зарегулирован Чудским озером, которое выступает в роли отстойника взвешенных минеральных частиц, поступающих с водосбора и со стоком притоков. За счет малых значений скоростей циркуляции озерных вод наносы притоков и продукты почвенной эрозии водосбора осаждаются на дно. Таким образом, незначительная мутность воды р. Нарвы в исследуемом створе и ее внутригодовое распределение в основном определены почвенно-эрозионными процессами частного водосбора. Ниже по течению небольшая мутность воды определяется влиянием Нарвского водохранилища, также выступающего в роли отстойника взвешенных веществ.

Для последующего анализа в работе использовались средние за пентаду данные наблюдений за расходами воды и мутностью, полученные в 2004–2017 гг. [Bobrovitskaya, Kokorev, 2004].

На рис. 2 приведен внутригодовой ход мутности воды р. Нарвы – д. Скамья, обобщенный за 2004–2017 гг. Нанесенная на диаграмму интерквартильного размаха линия медианы хорошо иллюстрирует асимметричность распределения месячных значений мутности воды в сторону больших значений. Наименьшие значения мутности приходятся на период зимней и весенней межени, наибольшие значения – на период половодья и осенне-зимних паводков.

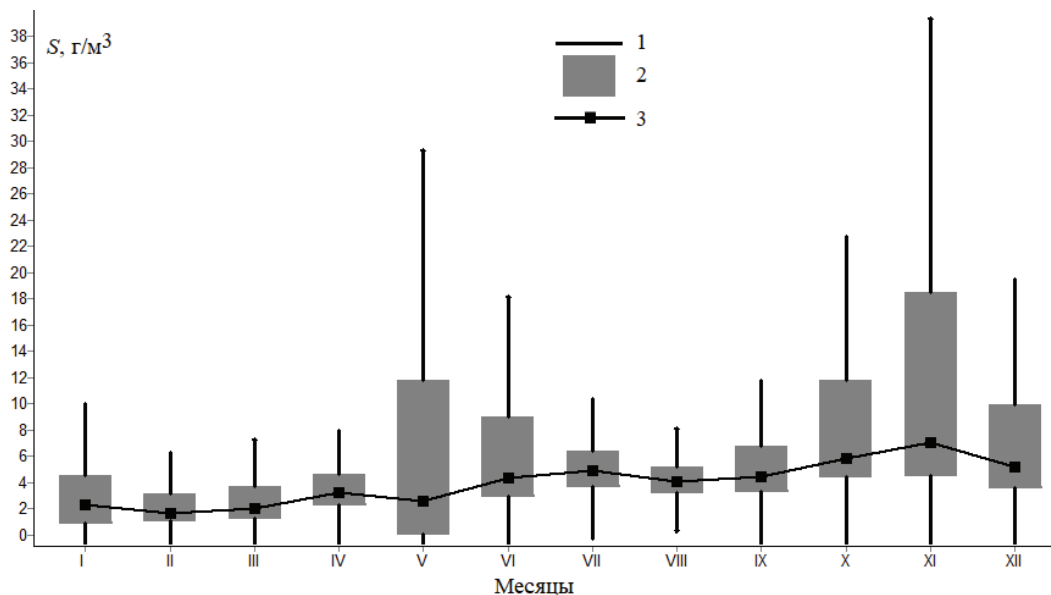


Рис. 2. Внутригодовой ход мутности воды р. Нарвы – д. Скамья, обобщенный за 2004–2017 гг.:

1 – нижняя и верхняя границы 1,5-интерквартильного размаха; 2 – диаграмма интерквартильного размаха;

3 – медианные значения мутности воды, г/м³

Fig. 2. Intra-annual dynamics of water turbidity in the Narva River – Skamya, generalized for 2004–2017: 1 – lower and upper boundaries of 1,5-interquartile span; 2 – diagram of interquartile span; 3 – median values of water turbidity, g/m³

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель формирования стока на водосборе ПЛ_НМ (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015) разработана в Институте озераведения РАН [Кондратьев, Шмакова, 2019] и предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади.

Стохастическая модель погоды СМП (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614228 от 09.04.2015) разработана под руководством Ю.Б. Виноградова [Виноградов, 1988] и практически реализована М.В. Шмаковой [Шмакова, 2000]. Модель служит основой для ДС моделирования характеристик стока, обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных математических моделей, входящих в моделирующую систему.

Модель погоды состоит из двух основных блоков, предназначенных для оценки параметров распределения суточных, месячных и годовых рядов метеорологических элементов по данным натурных наблюдений на выбранных метеостанциях и генерирования рядов метеорологических величин требуемой продолжительности.

Модель годового твердого стока рек разработана в Институте озераведения РАН (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014). Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой годового твердого стока в разных приложениях (расход наносов, мутность воды) и основана на композиционном методе теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов [Кондратьев, Шмакова, 2019].

$$G = \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_2} Q \left[\frac{c}{hg} - \rho_2 (1 - f) I \right]. \quad (1)$$

При этом формула мутности воды имеет вид

$$S = 10^3 \frac{G}{Q} = 10^3 \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_2} \left[\frac{c}{hg} - \rho_2 (1 - f) I \right], \quad (2)$$

где G – общий расход наносов, кг/с; S – мутность воды, г/м³; Q – расход воды, м³/с; $\rho_{\text{гр}}$ и ρ_2 – плотность грунта и воды соответственно, кг/м³; I – уклон дна, б/р; h – глубина потока, м; f – коэффициент внутреннего трения, б/р (допускается значение $f > 1$); c – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); g – ускорение свободного падения, м/с².

Параметры f и c формул (1) и (2) зависят от фазы водности водотока и крупности донных отложений.

Для определения значений параметра f могут быть использованы зависимости для разных периодов водности, приведенные в работе [Кондратьев, Шмакова, 2019].

В общем виде последовательность расчетов по модели годового твердого стока имеет вид:

- оценка параметров распределения суточных расходов воды (или нормализованных значений этой величины);
- генерирование ряда случайных чисел, подчиненных нормальному закону распределения или трехпараметрическому гамма-распределению;
- преобразование полученного ряда в ряд суточных расходов воды операциями, обратными нормированию и при необходимости нормализации;
- расчет значений средних глубин потока h при соответствующих расходах воды Q по функции $Q = f(h)$;
- вычисление значений расхода наносов или мутности воды для смоделированных расходов воды и средней глубины потока с использованием аналитической формулы расхода наносов с учетом периода водности (маловодный, многоводный, период средней водности);
- на основании полученного ряда расхода наносов или мутности воды построение кривой распределения расхода наносов (мутности воды) и оценка ее параметров.

Для приведения суточных расходов воды к нормальному закону распределения используется следующее выражение

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= (Q_i + 1)^n \ln(Q_i + 1), \\ \varepsilon_i &= e^{nQ_i} \ln(Q_i + 1), \\ \varepsilon_i &= (Q_i + 1)^n, \end{aligned} \quad (3)$$

где Q_i и ε_i – суточное значение расхода воды и его нормализованное значение, n – параметр нормализации. Либо, в случае хорошего соответствия эмпирических точек кривой трехпараметрического гамма-распределения, можно не прибегать к нормализации и генерировать ряд случайной величины в виде трехпараметрического гамма-распределения.

Основными этапами детерминировано-стохастического моделирования годового твердого стока и мутности воды являются (см. рис. 1):

- 1) оценка параметров стохастической модели погоды;
- 2) корректировка параметров модели с учетом принятого климатического прогноза;
- 3) генерирование рядов метеорологических величин (среднесуточной температуры воздуха и суточных слоев осадков);
- 4) моделирование рядов расхода воды (модель формирования стока);

5) оценка параметров распределения суточных расходов воды;

6) моделирование рядов расхода наносов и мутности воды (модель годового твердого стока);

7) оценка параметров распределения рядов расхода наносов и мутности воды на основании полученных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчетного створа р. Нарвы была построена кривая распределения суточных значений расхода воды и оценены параметры этой кривой. Соответствие эмпирического распределения суточных значений расхода воды аналитической кривой трехпараметрического гамма-распределения проверялось критерием согласия χ^2 (Пирсона) [Борщ, 2018]. Показано, что гипотеза соответствия эмпирической и аналитической кривых распределения при уровне значимости $\alpha = 2,5\%$ не опровергается.

По причине того, что в стоке наносов на расчетном участке Нарвы преобладают взвешенные частицы [Bobrovitskaya et al., 2003; Bobrovitskaya, Kokojev, 2004], для расчетов может быть использована аналитическая формула общего расхода наносов [Кондратьев, Шмакова, 2019]. Ввиду зарегулированности стока Нарвы и малой амплитуды уровня воды, параметры формулы оценивались минимизацией расхождения между рассчитанными и наблюдаемыми значениями мутности воды совместно для всех периодов водности. Среднее относительное отклонение между последними составило 66%. Большое отклонение объясняется тем, что для пара-

метризации формулы приняты не средние для потока наблюдаемые значения мутности воды, а пробы, взятые недалеко от берега. При этом верификация формулы на независимом материале (данные наблюдений за мутностью воды р. Нарвы за 2018–2019 гг.) показала вполне приемлемые результаты. Среднее относительное отклонение между рассчитанными и наблюдаемыми значениями мутности воды составило 63%.

Следующий этап моделирования состоял в генерировании ряда суточных значений расхода воды продолжительностью 100 лет (36500 значений) заданного закона распределения (трехпараметрического гамма-распределения). Далее для каждого значения расхода воды были рассчитаны средняя глубина потока и мутность воды. На рис. 3 и 4 приведены эмпирические кривые распределения наблюдаемых и смоделированных суточных значений расхода воды и мутности. Соответствие рядов наблюдаемых и смоделированных значений мутности проводилось по критерию Смирнова об однородности двух независимых выборок [Борщ, 2018]. Согласно проведенной оценке на соответствие двух независимых рядов следует, что сравниваемые выборки соответствуют одному закону распределения для 5% уровня значимости. Проверка соответствия средних значений по критерию Стьюдента и дисперсий по критерию Фишера показала, что при полученных значениях статистик $t = 2,14$ и $f = 1,08$ гипотезы о равенстве этих параметров распределения при уровне значимости $2\lambda = 2\%$ для среднего значения и при уровне значимости $\lambda = 10\%$ для дисперсии подтверждаются.

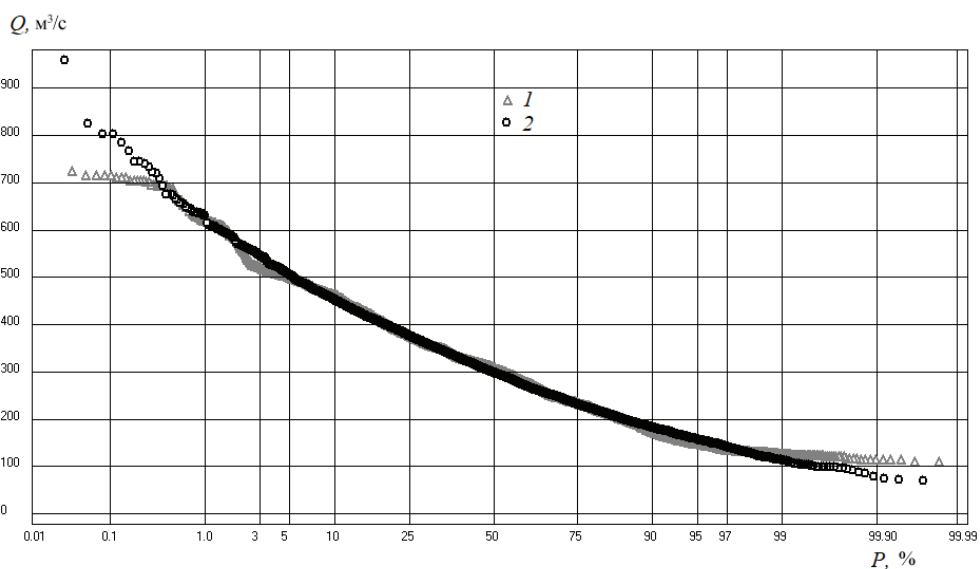


Рис. 3. Эмпирические кривые распределения наблюдаемых (1) и сгенерированных (2) суточных значений расхода воды, $\text{m}^3/\text{с}$

Fig. 3. Empirical distribution curves of observed (1) and generated (2) values of daily water discharge, m^3/s

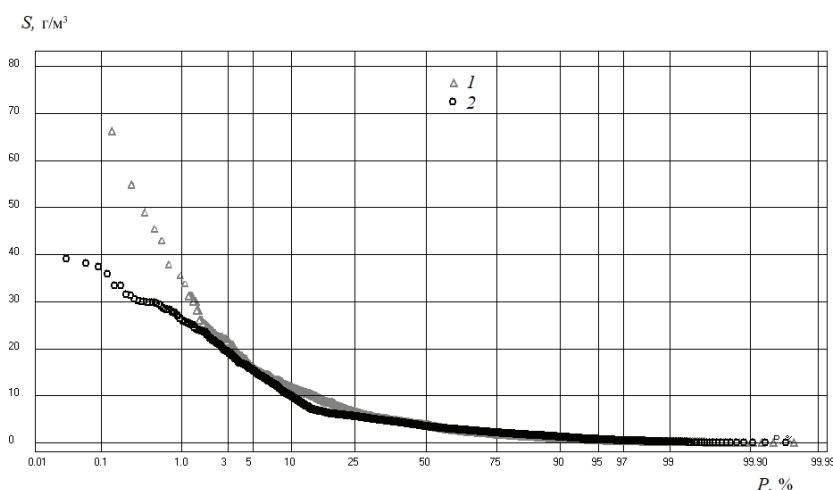


Рис. 4. Эмпирические кривые распределения наблюдаемых (1) и сгенерированных (2) суточных значений мутности воды, г/м³

Fig. 4. Empirical distribution curves of observed (1) and generated (2) values of daily water turbidity, g/m³

Расхождение кривых распределения рассчитанной и наблюдаемой мутности воды в области больших значений объясняется наличием отдельных выбросов в периоды большой воды, хорошо проиллюстрированных на рис. 2. Причиной такого несоответствия скорее всего является процедура отбора пробы воды на мутность в непосредственной близости от берега. Тогда как расчетная формула мутности воды представляет собой интегральное соотношение гидравлических переменных состояния потока и твердого вещества, осредненное в поперечном сечении. Тем не менее достаточно хорошее соответствие полученных результатов дает основание использовать разработанную ДС моделирующую систему для последующих численных экспериментов.

Ввиду большой водохозяйственной востребованности р. Нарвы определенную 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 [Карлин, 2010]. Прогностический период охватывает 2009–2099 гг. Вырезка осуществлена для расчетов по сценарию А2, соответствующему максимальной эмиссии CO_2 в атмосферу. Полученные результаты расчетов могут интерпретироваться как максимально возможные изменения искомых характеристик в условиях будущих наиболее неблагоприятных климатических изменений в регионе. В этом случае предполагается рост средней годовой температуры за 100 лет на 6°C , а рост средних годовых 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 для периода 1980–2010 гг. 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 ДС моделирующей системы (см. рис. 1). Параметры распределения расходов воды легли в основу генерирования рядов мутности воды. В таблице приведены параметры распределения суточных расходов воды и ее 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% . Как отмечалось выше, полученные оценки соответствуют наиболее неблагоприятным климатическим изменениям в регионе, вызванным максимальной эмиссией CO_2 в атмосферу. Можно предположить, что реальные изменения стока и мутности воды в реке в условиях постоянных попыток мирового сообщества сдерживать объемы выбросов парниковых газов в атмосферу будут находиться в интервале между современными значениями и результатами моделирования по экстремальному климатическому сценарию.

Таблица

Параметры распределения наблюдаемых и сгенерированных рядов (прогноз ЕСНАМ А2) расхода воды и мутности

Параметры	X_{cp}	C_v	M	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{25\%}-X_{75\%}$
Расход воды наблюдаемый, м ³ /с	312	0,35	308	376	234	142
Расход воды смоделированный (прогноз ЕСНАМ А2), м ³ /с	160	0,26	157	186	130	56
Мутность воды наблюдаемая, г/м ³	5,33	0,99	3,90	6,24	2,14	4,10
Мутность воды смоделированная (прогноз ЕСНАМ А2), г/м ³	9,53	0,64	8,73	13,6	4,68	8,92

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

ВЫВОДЫ

На настоящем этапе состояния наблюдательной сети государственного мониторинга при решении задач, связанных с моделированием и прогнозированием процессов формирования водных, эрозионных и гидрохимических потоков в системе «водосбор – водный объект» крайне эффективными и актуальными являются методы математического моделирования. Используемая в работе детерминировано-стохастическая моделирующая система позволила оценить текущие и прогнозные параметры распределения суточных значений стока наносов и мутности воды. Дополнительные возможности модели состоят в оценке статисти-

ческих параметров твердого стока при изменении условий формирования стока на водосборе, произошедших в результате естественных причин или хозяйственной деятельности. Практическая реализация модели на примере р. Нарвы показала хорошее соответствие между параметрами распределения наблюдаемых и рассчитанных рядов суточных значений мутности воды. Представленная численная реализация неблагоприятного климатического сценария, связанного с максимальной эмиссией парниковых газов в атмосферу, показала, что уменьшение стока реки, вызванное ростом температуры воздуха, может привести к значительному увеличению мутности воды.

Благодарности. Авторы работы выражают глубокую благодарность руководителю Отдела мониторинга поверхностных вод и экспедиционных исследований ФГБУ ГГИ д-ру геогр. наук Нелле Николаевне Бобровицкой за любезно предоставленные данные.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме FFZF-2024-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: МГУ, 1998. 201 с.
- Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. М.: Гидрометцентр России, 2018. 160 с.
- Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Опыт критического анализа. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
- Возняк А.А., Лепихин А.П. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример // Географический вестник. 2018. № 2(45). С. 103–115.
- Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 280 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.
- Кramer Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
- Лепихин А.П., Возняк А.А. Статистические функции распределения гидрохимических показателей качества воды поверхностных водных объектов // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. 2012. № 4. С. 21–32.
- 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.
- Шмакова М.В. Стохастическая Модель Погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования характеристик стока: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2000. 25 с.
- Ailliot P., Allard D., Monbet V., Naveau P. Stochastic weather generators: an overview of weather type models, *Journal de la Société Française de Statistique*, 2015, vol. 156(1), p. 101–113.

- Bailey N.T.J. The Elements of Stochastic Processes, John Wiley, New York, 1964, 39 p.
- Bobrovitskaya N.N., Kokorev A.V., Lemeshko N.A. Regional patterns in recent trends in sediment yields of Eurasian and Siberian rivers, *Global and Planetary Change*, 2003, vol. 39, p. 127–146.
- Bobrovitskaya N.N., Kokorev A.V. Development of trans-boundary surface water monitoring system. XXIII Nordic Hydrological Conference, Tallinn, Estonia 8–12 August 2004, Selected articles Arvo Jarvet (ed.), vol. 11, NHP Report, no. 48, Tartu, p. 415–423.
- Gumbel E.J. Statistical forecast of droughts, *IAHS Bulletin*, 1963, vol. 8, no. 1, p. 5–23.
- Jones J.W. A simulated environmental model of temperature, evaporation, rainfall and soil moisture, *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.*, 1972, no. 15, p. 0366–0372.
- Kondolf G.M., Rubin Z.K., Minear J.T. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation, *Water Resource Research*, 2014, vol. 50, iss. 6, p. 5158–5169.
- Larsen G.A., Pense R.B. Stochastic simulation of daily climatic data for agronomic models, *Agronomy Journal*, 1982, vol. 74, no. 3, p. 510–514.
- 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 Issue Three*, 1997.
- Nick A.D., Harp J.F. Stochastic generation of temperature and solar radiation data, *Journal of Hydrology*, 1980, 48 p.
- Racsko P.L., Szeidl L., Semenov M. A serial approach to local stochastic weather models, *Ecological Modelling*, 1991, vol. 57, p. 27–41.
- US EPA, *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs*, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA-822-B00-001, 2000.

Электронный источник

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации; Федеральное агентство водных ресурсов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=1> (дата обращения 25.06.2020).

Поступила в редакцию 07.07.2021

После доработки 05.03.2022

Принята к публикации 27.06.2022

MODELING OF STATISTICAL PARAMETERS OF WATER TURBIDITY IN RIVER FLOWS

M.V. Shmakova¹, S.A. Kondratyev²

^{1,2} St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Limnology, Laboratory of Mathematical Methods of Modeling

¹ Leading Scientific Researcher; D.Sc. in Geography; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

² Chief Scientific Researcher; D.Sc. in Mathematics and Physics; e-mail: 3718470@gmail.com

The economic use of water bodies in many ways relies on the calculation of solid runoff at various scales, from momentary to annual. Estimation of the annual solid runoff and the degree of its reliability, as well as the estimation of statistical parameters of turbidity are extremely difficult in case of irregular and insufficient illumination for different phases of water regime. At the same time, the knowledge of the processes of natural water quality formation and the elaboration of sufficient calculation methods allow reproducing the main indicators of water quality with acceptable accuracy. The statistical analysis of water quality indicators could be expanded through a comprehensive approach to their evaluation using well-established deterministic and stochastic calculation algorithms with arguments that are observed regularly and for a long time. In this case, a composite method can be applied to estimate the parameters of sediment flow or water turbidity distribution. The method allows finding the parameters of the distribution curve of a function through the parameters of the distribution curve of its arguments. The paper presents a deterministic-stochastic modeling system “weather-runoff-sediments”, based on a stochastic weather model, a model of runoff formation in the catchment and a model of annual solid runoff. The system makes it possible to estimate the parameters of the distribution of sediment load and turbidity daily values in case of insufficient observation data and changing conditions of runoff formation within the catchment resulting from natural causes or economic activities. The practical implementation of the modeling system for the Narva River showed a good correspondence between the distribution parameters of observed and calculated series of daily water turbidity values. The presented numerical implementation of the climate forecast showed that a decrease in river flow caused by increasing air temperature will lead to a significant increase in water turbidity.

Keywords: water turbidity, modeling, river flow, distribution parameters

Acknowledgments. The work was financially supported by the state assignment of the Institute of Limnology RAS (theme no. 0154-2019-0001).

The authors express deep gratitude to N.N. Bobrovitskaya, D.Sc., Head of the Department for Surface Water Monitoring and Expeditionary Research, State Hydrological Institute, St. Petersburg, for the kindly provided data.

REFERENCES

- Ailliot P., Allard D., Monbet V., Naveau P. Stochastic weather generators: an overview of weather type models, *Journal de la Société Française de Statistique*, 2015, vol. 156(1), p. 101–113.
- Alekseevskij N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnyh nanosov* [Formation and movement of river sediments], Moscow, Moscow State University Publ., 1998, 201 p. (In Russian)
- Bailey N.T.J. *The Elements of Stochastic Processes*, John Wiley, New York, 1964, 39 p.
- Bobrovitskaya N.N., Kokorev A.V., Lemeshko N.A. Regional patterns in recent trends in sediment yields of Eurasian and Siberian rivers, *Global and Planetary Change*, 2003, vol. 39, p. 127–146.
- Bobrovitskaya N.N., Kokorev A.V. Development of transboundary surface water monitoring system. XXIII Nordic Hydrological Conference, Tallinn, Estonia 8–12 August 2004, Selected articles Arvo Jarvet (ed.), vol. 11, *NHP Report*, no. 48, Tartu, p. 415–423.
- Borshch S.V., Hristoforov A.V., Yumina N.M. *Statisticheskij analiz v gidrologicheskikh prognozach*. [Statistical analysis in hydrological forecasts], Moscow, Russia Hydrometeorological center, 2018, 160 p. (In Russian)
- Gel'fan A.N. *Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka* [Dynamic-stochastic modeling of melt runoff formation], Moscow, Nauka Publ., 2007, 280 p. (In Russian)
- Gumbel E.J. Statistical forecast of droughts, *IAHS Bulletin*, 1963, vol. 8, no. 1, p. 5–23.
- Jones J.W. A simulated environmental model of temperature, evaporation, rainfall and soil moisture, *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.*, 1972, no. 15, p. 0366–0372.
- Karlin L.N. *Prognosticheskie ocenki vliyaniya izmeneniya klimata na ekologicheskoe sostoyanie Baltijskogo moraya* [Prognostic assessments of the impact of climate change on the ecological state of the Baltic Sea], Report for project RFFR no. 09-05-13553, 2010. (In Russian)
- Kondolf G.M., Rubin Z.K., Minear J.T. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation, *Water Resource Research*, 2014, vol. 50, iss. 6, p. 5158–5169.
- Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V. *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v sisteme "vodobor – vodotok – vodoem"* [Mathematical modeling of mass transfer in the "catchment – watercourse – reservoir system"], St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2019, 248 p. (In Russian)
- Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical methods in statistics], Moscow, Mir Publ., 1975. 648 p. (In Russian)
- Larsen G.A., Pense R.B. Stochastic simulation of daily climatic data for agronomic models, *Agronomy Journal*, 1982, vol. 74, no. 3, p. 510–514.
- Lepihin A.P., Voznyak A.A. Statisticheskie funktsii raspredeleniya gidrohimicheskikh pokazatelej kachestva vody poverhnostnykh vodnykh ob'ektov [Statistical functions of the surface water bodies' water quality hydrochemical indicators distribution], *Vodnoe hozyajstvo Rossii. Problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2012, no. 4, p. 21–32. (In Russian)
- 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 Issue Three*, 1997.
- Nick A.D., Harp J.F. Stochastic generation of temperature and solar radiation data, *Journal of Hydrology*, 1980, 48 p.
- Racsko P.L., Szeidl L., Semenov M. A serial approach to local stochastic weather models, *Ecological Modelling*, 1991, vol. 57, p. 27–41.
- Shmakova M.V. *Stokhasticheskaya Model' Pogody v sisteme determinirovanno – stokhasticheskogo modelirovaniya harakteristik stoka* [Stochastic Weather Model in the system of deterministic stochastic modeling of flow parameters], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Technic, St. Petersburg, Russian State Hydrometeorol. University Publ., 2010, 25 p. (In Russian)
- Smyzhova E.S. *Ocenka stoka biogennykh veshchestv s uchytom osobennostej gidrohimicheskoy informatsii (na primere reki Velikoj)* [Assessment of runoff of biogenic substances taking into account the features of hydrochemical information (case study of the Velikaya River)], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, St. Petersburg, Russian State Hydrometeorol. University Publ., 2010, 27 p. (In Russian)
- US EPA. *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs*, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA-822-B00-001, 2000.
- Vinogradov Yu.B. *Matematicheskoe modelirovanie processov formirovaniya stoka. Opyt kriticheskogo analiza* [Mathematical modeling of flow formation processes. Experience of critical analysis], Leningrad, Hydrometeorological Publ., 1988, 312 p. (In Russian)
- Voznyak A.A., Lepihin A.P. *Razrabotka regional'nykh PDK: neobhodimost', metodika, primer* [Development of regional MPC: necessity, methodology, example], *Geograficheskij vestnik*, 2018, no. 2(45), p. 103–115. (In Russian)
- Web source*
 Avtomatizirovannaya informacionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov (AIS GMVO) [Automated information system for state monitoring of water bodies (AIS SMWO)], Ministerstvo prirodnih resursov i ekologii Rossijskoj Federacii Federal'noe agentstvo vodnykh resursov [Ministry of natural resources and ecology of the Russian Federation Federal Agency for water resources], URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=1> (access date 25.06.2020).

Received 07.07.2021

Revised 05.03.2022

Accepted 27.06.2022