

**ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННО-СТОХАСТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ КРИВЫХ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ПАШИ)**

© 2012 г. С.А. Журавлев

*Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** гидрологическое моделирование, детерминированно-стохастический подход, кривая обеспеченности.



Представлен пример совмещенного использования детерминированной модели «Гидрограф» и стохастической модели «Погода», позволяющего вычислять координаты кривых распределения годовых, месячных, суточных, максимальных и минимальных расходов воды. В качестве объекта моделирования выбран бассейн р. Паши. Данный подход позволяет получать физически обоснованные характеристики стока для широкого интервала вероятностей превышения. Кривые распределения стока, полученные с помощью детерминированно-стохастического подхода, сравниваются с кривыми, рассчитанными по долговременным рядам наблюдений за стоком, на основе чего делается вывод о перспективности рассмотренного подхода.

## **Введение**

Определение координат кривых распределения стока является одной из основных проблем инженерной гидрологии. В последнее время в гидрологической литературе уделяется большое внимание детерминированно-стохастическому моделированию процессов формирования стока [1–3]. Особенностью данного подхода является совместное использование детерминированной модели формирования стока и стохастической модели – «генератора» погоды, которое позволяет не только

устанавливать величины расходов воды различной вероятности превышения, но и проводить анализ условий, приводящих к формированию экстремальных расходов воды, выявляя причины, их обуславливающие.

В настоящей статье на основе комплекса моделей, разработанных в Государственном гидрологическом институте под руководством проф. Ю.Б. Виноградова, проведены расчеты координат кривых распределения средних годовых, максимальных и минимальных расходов воды р. Паши. Целью исследования является оценка адекватности воспроизведения комплексом моделей распределений характеристик стока. Для этого была осуществлена численная реализация модели на примере реки Паши, проведен сравнительный анализ распределений характеристик стока, рассчитанных с помощью детерминированно-стохастического моделирования и традиционных схем гидрологических расчетов, воспроизведены критические сочетания, приводящие к формированию экстремальных расходов воды, а также выявлены особенности модели формирования стока «Гидрограф», приводящие к повышению неопределенности расчетных расходов воды. Впервые для выбранной моделирующей системы была проведена оценка чувствительности статистических характеристик (на примере максимального расхода воды обеспеченностью 1%) к изменениям параметров, отражающих процессы формирования стока весеннего половодья.

## **Объект исследования**

Река Паша, расположенная в бассейне Ладожского озера, является крупнейшим притоком р. Свири. Река берет начало на западном склоне Вепсовской возвышенности, вытекая из оз. Пашозера на уровне 115 м и впадая в р. Свирь на уровне 5 м в 8 км от Ладожского озера. Наблюдения за речным стоком проводятся в створе д. Часовенское. Площадь водосбора в этом створе — 5710 км<sup>2</sup>, основную часть водосбора (85 %) занимают смешанные леса, 15 % площади бассейна приходится на пашни, луга, озера и заболоченные территории (рис. 1).

Водный режим р. Паши характеризуется высоким непродолжительным весенним половодьем, редкими летне-осенними паводками, неустойчивой летней меженью и продолжительной (3,5–4,0 месяца) зимней меженью (рис. 2). Максимальные годовые расходы воды в абсолютном большинстве случаев формируются весенним половодьем, а минимальные в 65 % случаев наблюдаются в период летней межени.



Рис. 1. Картограмма бассейна р. Паши.

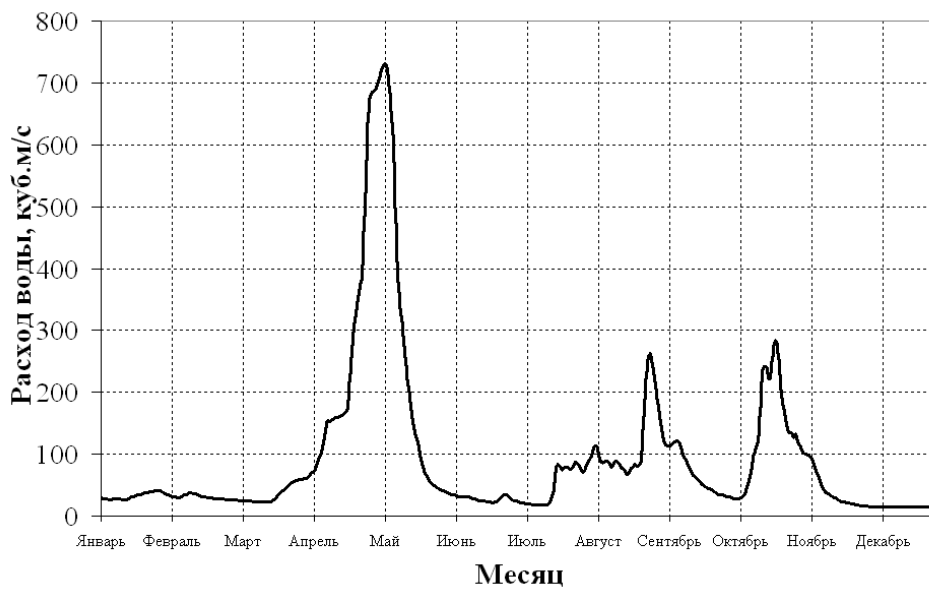


Рис. 2. Гидрограф стока р. Паши – д. Часовенское за 1993 г. (высокой водности).

## Методы и материалы исследования

Методологической основой работы является совместное использование стохастической модели «Погода» – генератора случайных полей, соответствующих метеорологическому воздействию на водосбор и детерминированной модели формирования стока «Гидрограф».

*Модель «Гидрограф»* учитывает основные процессы формирования стока (поверхностное, почвенное и подземное стокообразование, динамику почвенных вод в 10 расчетных слоях почв глубиной по 0,1 м и фазовые переходы в почве, склоновую и русловую трансформацию стока). Входной информацией в модель являются метеоданные (суточные величины температуры воздуха, дефицита влажности, слоя и продолжительности осадков). Выход модели – непрерывные гидрографы стока рек в замыкающем створе. Проверка работоспособности модели и адекватности расчетов проводится на основе сопоставления рассчитанных и полученных по фактическим данным наблюдений гидрографов стока, характеристик снежного покрова, температуры и влажности почвы.

*Модель «Погода»* генерирует случайные последовательности чисел, соответствующие суточным значениям температуры воздуха, дефицита влажности воздуха и суточным слоям осадков. Предварительно по данным наблюдений на ближайших метеостанциях проводится оценка параметров модели. Параметры модели отдельно описывают ход суточных (погодных) и годовых (климатических) метеорологических величин. Генерация последовательностей чисел осуществляется в расчетных точках, единых для стохастической и детерминированной моделей в пределах исследуемого бассейна. Количество расчетных точек зависит от площади бассейнов и освещенности его гидрометеорологической информацией. Более подробное описание структуры моделей «Гидрограф» и «Погода» приведено в монографиях ее автора проф. Ю.Б. Виноградова [1, 2].

После оценки параметров стохастической модели «Погоды» проводится интерполяция параметров из метеостанций в расчетные точки, для которых проводится генерация рядов чисел, соответствующих значениям температуры воздуха, относительной влажности воздуха, продолжительности и суточного слоя осадков. Сгенерированные ряды поступают на вход в детерминированную модель, при этом относительная влажность пересчитывается в дефицит влажности по эмпирическому уравнению (1)

$$d = (6,1078 \exp[17,649\tau / 243,33 + \tau]) * (1 - e), \quad (1)$$

где  $\tau$  – температура воздуха;

$e$  – относительная влажность воздуха.

Совмещение моделей проводится в несколько этапов:

- 1) детерминированное моделирование гидрографов стока с суточным шагом по времени за период, освещенный данными гидрометрических наблюдений;
- 2) оценка параметров стохастической модели погоды на основе обработки многолетних метеорологических рядов;
- 3) стохастическое моделирование метеорологических показателей (получение рядов чисел, соответствующих значениям температуры воздуха, относительной влажности воздуха, продолжительности и суточного слоя осадков) за продолжительные отрезки времени (от 100 до 10000 лет)
- 4) поступление сгенерированных рядов метеозаписей в детерминированную модель;
- 5) моделирование непрерывных гидрографов стока на основе входной информации из модели «Погода»;
- 6) выбор расчетных характеристик стока;
- 7) построение и сравнение эмпирических кривых распределения характеристик стока.

Материалами исследования послужили данные наблюдений по ближайшим к бассейну р. Паши метеорологическим станциям (Тихвин, Шугозеро, Ефимовский, Лодейное Поле, Винницы) с 1955 по 2009 гг. Суммарная длина сгенерированного ряда наблюдений составила 1000 лет. Ранее выполненные реализации представляемой модели проводились для сгенерированных рядов длиной не более 100 лет, что не позволяло оценить ее поведение на крайних участках кривых обеспеченностей.

Эти данные поступали на вход в модель «Гидрограф», для которой в пределах водосбора было выделено два стокоформирующих комплекса:

- 1) смешанные леса на суглинках (85 %);
- 2) пашни и луга (15 %).

Параметры модели «Гидрограф» назначались по данным справочных и картографических материалов [4–6] для каждого стокоформирующего комплекса. Верификация модели проводилась по ряду наблюдений за стоком в д. Часовенское за период 1970–2009 гг. [7]. Средний критерий качества Нэша–Сатклифа ( $Ef=0,88$ )

средних суточных расходов воды позволил констатировать удовлетворительное совпадение рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока.

## Результаты и обсуждение

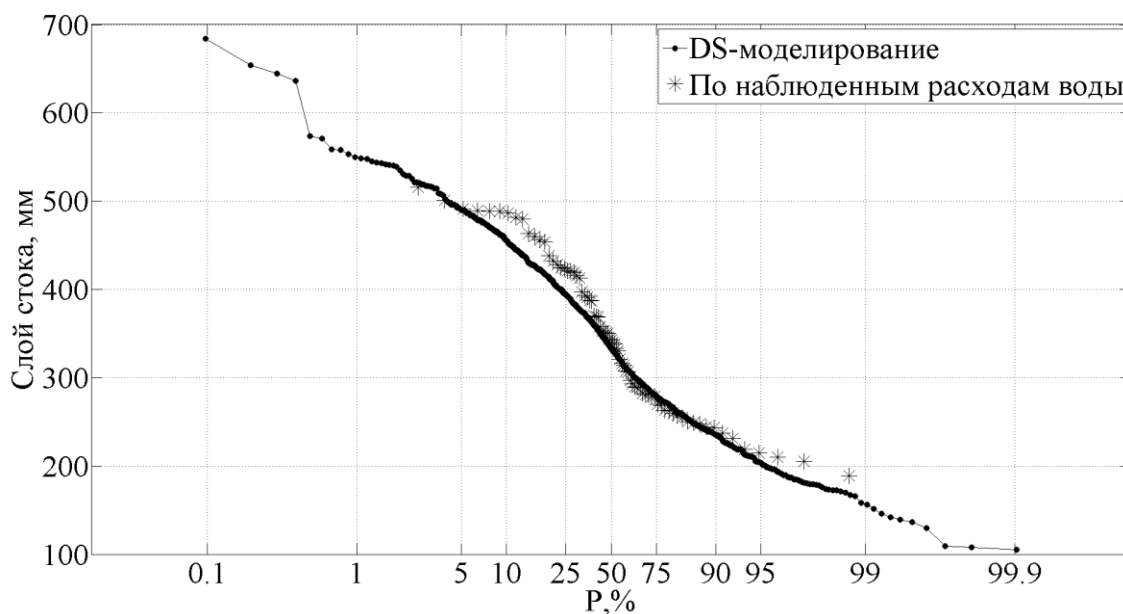
На рис. 3–4 приводятся кривые распределения ежегодных вероятностей превышения годовых слоев стока, максимальных и минимальных расходов воды р. Паши, построенные с помощью DS-моделирования и по многолетним рядам наблюдения за стоком [8].

Кривые обеспеченности годовых слоев стока (см. рис. 3) удовлетворительно воспроизводятся в пределах области наблюдений (от 2 до 98 %). Экстремальные величины, по-видимому, требуют уточнения. Данное предположение связано с очевидными недостатками применяемого метода расчета испарения с поверхности суши, в котором последнее зависит только от дефицита влажности воздуха.

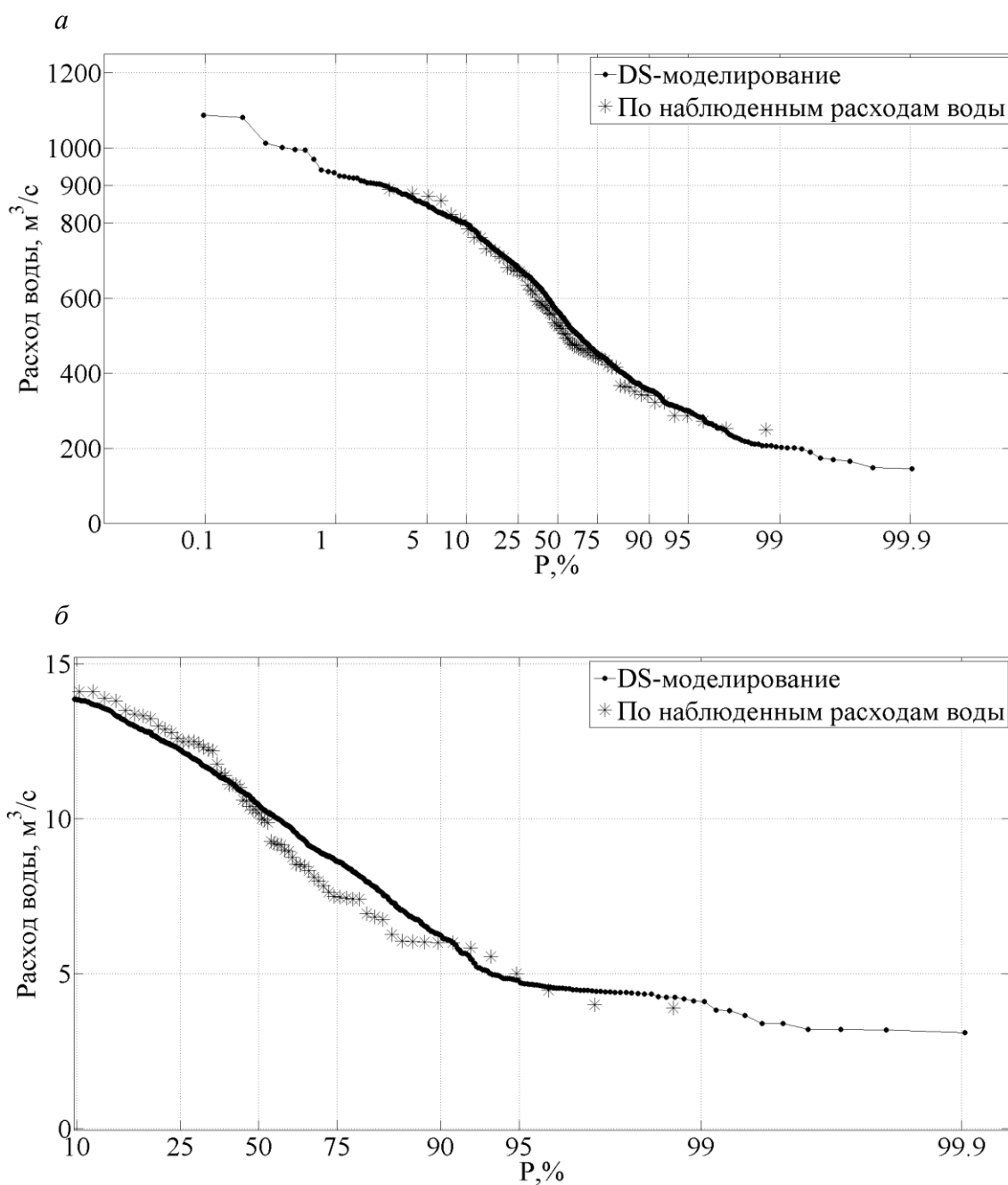
Кривые распределения максимальных расходов воды, построенные по двум методам, в целом совпадают (см. рис. 4а). Отдельно следует рассмотреть точки с рассчитанными возможными максимальными расходами воды более 900 м<sup>3</sup>/с, не наблюдавшимися на р. Паше. Указанным величинам (25 случаев из 1000) соответствуют не только высокие снегозапасы (в среднем на 43 % выше нормы в 215 мм), но и дружная весна со значительным количеством жидких осадков, выпавших на водосбор в период наиболее интенсивного снеготаяния. Из 25 имитированных выдающихся половодий лишь в 3 случаях снегозапасы были ниже нормы и в 5 случаях в период наиболее интенсивного снеготаяния имитировался соляренный тип весны. Таким образом, для рассматриваемой области к формированию экстремального расхода воды вероятностью превышения менее 1 % приводит наложение волн весеннего половодья и дождевого паводка. Верхние слои почвы (до 50 см) при формировании выдающихся половодий имеют влагозапас, близкий к наименьшей влагоемкости. Отметим, что в модели «Гидрограф» отсутствует блок расчета миграции влаги к фронту промерзания. Вследствие этого в течение зимнего периода в расчетной почвенной колонке не происходит перераспределение влаги. Это приводит к невозможности моделирования эффекта «запирающего слоя», что может приводить к занижению расчетных максимальных расходов воды весеннего половодья.

Кривые распределения минимальных расходов воды (см. рис. 4б) получены для периодов летней межени. Величины с обеспеченностью 50–90 и более 95 %,

соответствующие засушливым условиям, лежат несколько выше (5–7 %) кривой, построенной по данным многолетних наблюдений (см. рис. 4а). Здесь следует особенно отметить, что модель «Гидрограф» не учитывает колебания уровней грунтовых вод и, соответственно, не может воспроизводить многолетние изменения запасов воды в верхних водоносных горизонтах. Используемая в модели схема, в которой подземное питание зависит от количества ярусов подземных вод, однозначно увязанных с площадью водосбора, не может с достаточной определенностью воспроизвести минимальные расходы летней межени обеспеченностью более 99%.



**Рис. 3.** Кривые распределения годовых слоев стока р. Паши, полученные с помощью DS-моделирования и по данным многолетних наблюдений за стоком.



**Рис. 4.** Кривые распределения расходов воды р. Паши, полученные с помощью DS-моделирования и по данным многолетних наблюдений за стоком:  
а – максимальных; б – минимальных летних.



## Оценка чувствительности модели к изменениям параметров

Одной из наиболее важных задач, требующих отдельного рассмотрения, является оценка чувствительности кривых обеспеченностей к изменениям параметров моделей [3]. Метод исследования чувствительности может быть разложен на следующие составляющие:

- 1) выбор критических параметров, наиболее сильно влияющих на результирующую форму гидрографа и кривой обеспеченности;
- 2) изменение каждого параметра в пределах установленного диапазона изменчивости относительно базового значения при фиксированных значениях остальных параметров;
- 3) проведение расчетов с измененными значениями параметров;
- 4) оценка изменений статистических характеристик при новых значениях параметров.

Применительно к модели «Гидрограф» наиболее значимыми для расчета максимальных расходов воды весеннего половодья являются следующие параметры:

- $C_v$  – пространственный коэффициент вариации запасов воды в снежном покрове (диапазон изменений при оценке чувствительности модели  $0,25 \pm 0,05$ );
- $K_f$  (мм/мин) – коэффициенты фильтрации почвы ( $1,3 \pm 0,4$ );
- МВС (мм) – максимальная водоудерживающая способность почвы ( $27 \pm 5$ ).

Для каждого случая при одном и том же метеорологическом входе проводилось моделирование гидрографов стока за ряд длиной в 1000 лет, после чего оценивалось влияние изменения параметров на расход воды 1 % обеспеченности (таблица).

**Таблица.** Чувствительность рассчитанных максимальных расходов воды 1 % обеспеченности к изменениям параметров модели «Гидрограф»

	$C_v$			МВС, мм			$K_f$ , мм/мин		
	0,2	0,25	0,3	22	27	32	0,9	1,3	1,7
$Q_{1\%}$ , м <sup>3</sup> /с	1020	927*	906	937	927*	916	958	927*	901

Примечание: \* расход воды 1 % обеспеченности при базовых величинах параметров.

Интересным эффектом, выявленным в ходе представленного вычислительного эксперимента, стало несимметричное распределение «экспериментальных» оценок  $Q_{1\%}$  относительно базовой рассчитанной величины для параметра  $C_v$ . Наиболее чувствительна модель к заданию пространственного коэффициента вариации запасов воды в снежном покрове. Так, его снижение на 20 % приводит к повышению  $Q_{1\%}$  на 10 %. Это объясняется значительным влиянием распределения снежного покрова на продолжительность и интенсивность стокообразования. Следует отметить, что данный параметр зачастую несет в себе значительную долю неопределенности, т. к. для его оценки требуются не всегда доступные данные маршрутных снегомерных съемок. Снижение неопределенности данного параметра, и как следствие, повышение надежности оценок максимальных расходов воды весеннего половодья возможно за счет совместного использования наземных и дистанционных методов зондирования снежного покрова.

## **Заключение**

В статье рассмотрен опыт применения детерминированно-стохастического моделирования для определения координат кривых обеспеченности характеристик речного стока. Сравнение кривых, полученных с помощью DS-моделирования и по многолетним рядам наблюдений за стоком, подтверждают перспективность предложенного подхода. Тем не менее, при реализации данного подхода следует обратить особое внимание на надежность оценок тех параметров, к которым модель наиболее чувствительна. В частности, для модели «Гидрограф» при расчетах максимальных расходов воды весеннего половодья, таким параметром является пространственный коэффициент вариации запасов воды в снежном покрове.

Дополнительных исследований с помощью численных экспериментов требуют вопросы анализа причин отклонений наблюдаемых и рассчитанных гидрографов стока и соответствующих кривых распределений, оценки влияния неопределенности в задании параметров моделей на вероятностные характеристики стока, а также выбор оптимальной длины моделируемого ряда, при которой достигается устойчивость статистических оценок характеристик стока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010. 304 с.
2. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
3. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 279 с.
4. Агроклиматический справочник по Ленинградской области. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 176 с.
5. Агрогидрологические свойства почв северо-западных районов ЕТС. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 366 с.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики . Том 2 : Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 704 с.
7. Гидрологический ежегодник. Том 1, вып. 0–3. Бассейн Балтийского моря. 1936–2009.
8. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. Типография «Вектор-Тис», Нижний Новгород, 2007. 77 с.

### **Сведения об авторе:**

Журавлев Сергей Александрович, ведущий инженер-программист, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт», 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия, д. 23; e-mail: hydromod@gmail.com