

С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОКА РЕКИ НЕВЫ
В УСЛОВИЯХ ВОЗМОЖНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

S.A. Kondratyev, M.V. Shmakova

**MATHEMATICAL MODELING OF THE RIVER NEVA RUNOFF
IN CONDITIONS OF POSSIBLE CLIMATE CHANGE**

Выполнена оценка параметров распределения стока с водосбора Ладожского озера и реки Невы на конец XXI в. с учетом возможных изменений климатических параметров (осадков и температуры воздуха).

Ключевые слова: детерминированно-стохастическое моделирование, водосбор, климат, речной сток.

Runoff distribution parameters of the Lake Ladoga and the Neva River catchment at the end of the XXI century were estimated. Possible changes of climatic parameters (precipitation and temperature) were taken into account.

Key words: determined-stochastic modeling, catchment, climate, river runoff.

Общие положения

Математическое моделирование природных процессов может быть представлено двумя основными направлениями — детерминированным и стохастическим [2, с. 9]. Детерминированные модели основаны на физически обоснованном описании основных изучаемых процессов и определяют однозначную связь между входом и выходом модели. Стохастические (вероятностные) модели учитывают вероятностную структуру изучаемых процессов и представляют собой математические модели, в которых входные величины и некоторые параметры представлены параметрами распределения плотности вероятности. Каждому из этих направлений моделирования присущи собственные задачи и цели. Расширение научных возможностей математического моделирования, а также области его практического применения, может быть достигнуто при объединении перечисленных основных направлений в рамках детерминировано-стохастических (ДС) моделей [4, с. 165].

ДС модели представляют собой различные приложения теории вероятности к детерминированным моделям, что расширяет спектр решаемых задач. Основой детерминировано-стохастического моделирования в гидрологии и смежных науках является расчет параметров кривых распределения функции через кривые распределения аргументов, используя детерминированное описание природного процесса. Выбор того или иного подхода в ДС моделировании обусловлено задачами, которые стоят перед исследователем. В связи с возможными изменениями климата часто рассматриваются их последствия, выраженные в изменении структуры пространственно-временных рядов, например, стока. Нередко возникают задачи оценки чувствительности

гидрологических или экологических систем к различного рода планируемым антропогенным мероприятиям или уточнения параметров распределения временных рядов.

Целью настоящей работы является модельная оценка параметров распределения стока с водосбора Ладожского озера и реки Невы для условий конца XXI в. с учетом возможных изменений климатических параметров (осадков и температуры воздуха).

ДС модель

При моделировании стока одной из основных проблем, ограничивающих возможности калибровки и верификации моделей и снижающих достоверность расчетов, является недостаток данных натуральных наблюдений. В то же время для решения широкого круга прикладных задач, связанных с оценкой возможных изменений стока в результате климатических изменений и антропогенной нагрузки, требуется оценка не только средних значений искомым величин, но и параметров функций их распределения, позволяющих рассчитывать соответствующие обеспеченности превышения. Средством решения такого рода задач могут служить ДС модели, включающие блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов [стохастическую модель погоды (СМП) в качестве входа в последующие детерминированные блоки модели [4, с. 168]. Схема ДС модели, построенной для решения задач, связанных с оценкой не только средних значений стока, но и параметров распределения, приведена на рис. 1.

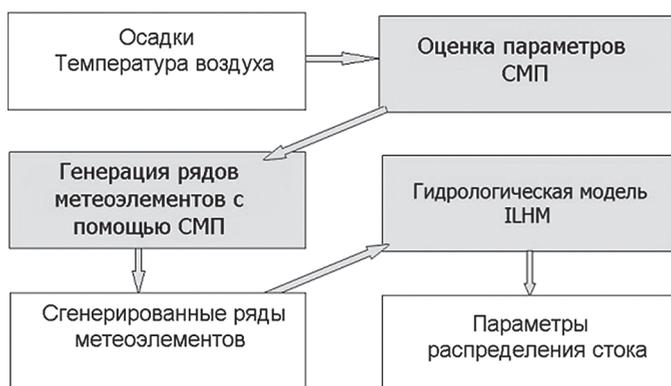


Рис. 1. Схема ДС модели стока

Кроме генератора рядов метеозаэментов в виде стохастической модели погоды предложенная ДС модель включает гидрологическую модель формирования стока с водосбора. В данном случае это модель *ИЛНМ*, описанная ниже.

Стохастическая модель погоды (СМП)

Для оценки возможных изменений параметров распределения гидрологических характеристик разработана и практически реализована стохастическая модель погоды

[6, с. 15], которая служит основой для ДС моделирования характеристик стока и обеспечивает поток метеорологической информации на вход детерминированной модели формирования стока. Модель погоды состоит из двух основных частей — оценка параметров распределения метеоэлементов по данным натуральных наблюдений на выбранных метеостанциях и затем генерирование рядов метеорологических элементов требуемой продолжительной длины.

В первой части модели оцениваются следующие параметры:

1. Параметры одно- или двухгармонической синусоиды среднемноголетних суточных рядов:
 - температура воздуха (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловная);
 - среднее квадратичное отклонение суточной температуры воздуха (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловное);
 - дефицит влажности воздуха (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловный);
 - среднее квадратичное отклонение суточного дефицита влажности воздуха (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловное);
 - вероятность выпадения осадков (в дни с осадками, в дни без осадков, безусловная);
 - средняя относительная величина выпавших осадков.
2. Параметры усеченной нормализованной функции распределения суточные сумм осадков (в дни с осадками накануне, в дни без осадков накануне, безусловные).
3. Пространственно-временные корреляционные связи для рядов суточных и среднегодовых метеорологических величин.

Генерирование рядов метеорологических элементов требуемой продолжительной длины осуществляется для назначенных на водосборе расчетных точек или для метеорологических станций. В случае несовпадения расчетных точек с метеостанциями параметры СМП интерполируются по данным соседних метеостанций в расчетные точки. При моделировании используются гипотезы о функционально-нормальном законе распределения метеорологических величин, что позволяет использовать хорошо разработанный для нормального закона распределения корреляционный аппарат, а также о стационарности случайных процессов, однородности и изотропности случайных полей. Схема СМП приведена на рис. 2.

Модель формирования стока (ILHM)

Гидрологическая модель формирования стока с водосбора *ILHM* (Institute of Limnology Hydrological Model) разработана в Институте озероведения РАН [3, с. 134] и предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стоков 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. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной

имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. В модели предусмотрен расчет глубины водоема, принимающего сток с водосбора, в результате решения уравнения водного баланса в предположении равенства значений испарения с водной поверхности и испаряемости. Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных в северо-западном регионе России (водосборы рек Тигода, Лижма, Сяньга, Олонка, Сунна, Шуя, Оять, Сясь, Вуокса, Свирь, Великая, Нева) и Финляндии (водосборы рек Мустайоки и Харайоки) [3, с. 134].

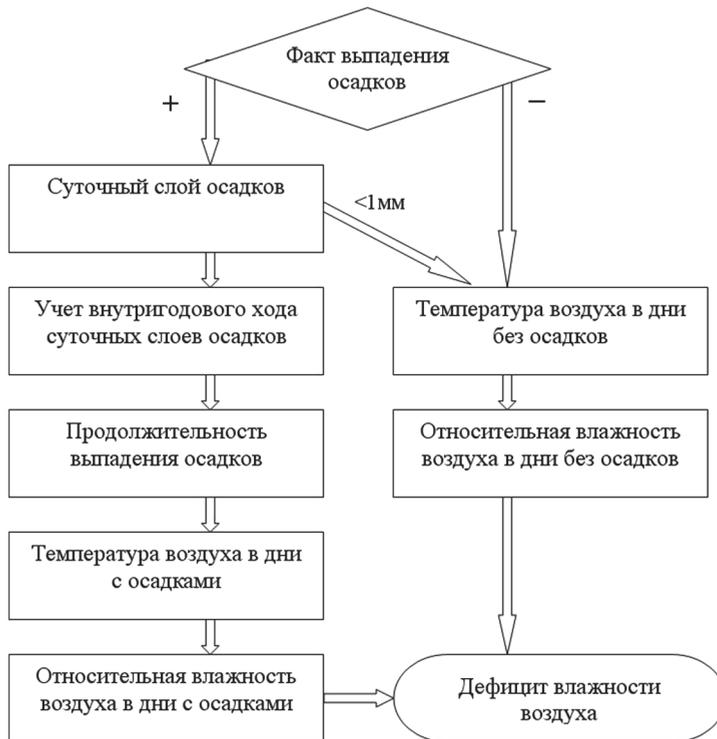


Рис. 2. Схема СМП

Объект исследования

Водосбор Ладожского озера и реки Невы (рис. 3), имеющий площадь 183 300 км² (без водных акваторий), покрыт густой сетью водотоков (0,45 км/км²), многочисленными озерами и обширными болотами [5, с. 35]. Наиболее значительными водотоками являются реки: Волхов, Свирь, Вуокса, Сясь, Оять, Паша и Мста. Реки располагаются обычно по наиболее низким участкам — по оси древних днищ водоемов. В период регрессии водоемов здесь существовали заливы или проливы между соседними водоемами. Поэтому основные реки водосбора в настоящее время представляют протоки, через которые крупные озера сбрасывают свои воды.

Реки бассейна Невы имеют смешанное питание с преобладанием снегового (от 40 до 50 % годового стока) с высоким половодьем, низкой летней и зимней меженью и подъемами уровня воды осенью под влиянием обложных дождей. Эти черты режима рек в ряде случаев нарушаются в результате регулирующего влияния озер, что наиболее ярко проявляется на крупных реках, имеющих характер протоков, соединяющих большие озера.

Озера играют заметную роль в общем гидрографическом облике данной территории. Наряду с наиболее значительными озерами (Ладожское, Онежское, Ильмень и расположенное на территории Финляндии озеро Сайма) здесь имеется большое количество средних и малых озер. Наиболее ярко выражено скопление озер в системе реки Вуокса, в долине реки Свирь, в верховьях реки Сясь, а наибольшее количество озер и других водоемов — на Карельском перешейке. Большинство озер имеет ледниковое происхождение. Почти все они продолговатой формы, вытянуты с северо-запада на юго-восток, через многие из них протекают реки. На востоке и юго-востоке территории представлены карстовые озера. В Карелии и в бассейне реки Волхов встречаются озера болотного типа, незначительные по площади (не более 0,5–1 км²), с илистым дном. Большинство озер — проточные.



Рис. 3. Схема водосбора Ладожского озера и реки Невы

Почти пятая часть территории (около 17 %) занята болотами. Распространению болот способствует избыточная влажность, плоский рельеф и близкое к поверхности залегание грунтовых вод. Более половины общей площади болот — крупные болотные массивы с площадью свыше 1 000 га. Крупнейшими из них являются Зеленецкий

Мох (60,2 тыс. га в бассейне реки Сясь), Соколий и Гладкий Мох (29,4 тыс. га, между реками Сясь и Паша). Наибольшее количество болот распространено в бассейнах рек Волхов, Свирь и Вуокса.

Результаты ДС-моделирования

ДС моделирование формирования стока выполнялось по следующим основным этапам:

1. Оценка параметров СМП для наблюдаемых рядов метеорологических элементов в изучаемом регионе (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков).
2. Генерирование рядов метеорологических элементов продолжительной длины.
3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.
4. Моделирование месячных (годовых) слоев стока по детерминированной модели формирования стока, прошедшей верификацию в изучаемом регионе.
5. Оценка параметров распределения годовых значений стока (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).

Итогом ДС моделирования формирования стока на изучаемом объекте является кривая распределения годовых значений слоя стока.

Оценка параметров стохастической модели погоды проведена по данным наблюдений трех метеостанций, расположенных на территории водосбора реки Невы и Ладожского озера: Сортавала, Петрозаводск и Тихвин для периода с 1970 по 2010 г. Полученная информация явилась основой для генерирования метеорологических рядов среднесуточной температуры воздуха и суточных слоев осадков продолжительностью 100 лет, которые затем поступали на вход детерминированной составляющей ДС модели.

Работа модели формирования стока *ЛНМ* проиллюстрирована на рис. 4. Здесь представлены рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока для р. Невы (створ — д. Новосаратовка) за период с 2000 по 2010 г. Метеорологические параметры, являющиеся входом в гидрологическую модель, получены осреднением данных наблюдений указанных выше трех метеостанций. Среднее относительное отклонение между наблюдаемыми и рассчитанными среднемесячными расходами воды составило 6 % по отношению к наблюдаемым значениям, критерий Нэша-Сатклиффа — 77 %, что подтверждает адекватность модели описываемым процессам.

Для оценки возможных изменений стока в будущем использовался детерминированный сценарий климатических изменений, разработанный именно для водосбора Ладожского озера [1, с. 42]. В табл. 1 приведены значения, на которые согласно упомянутому сценарию изменятся среднемесячные значения температуры воздуха и месячные суммы осадков к концу 2100 г. по отношению к значениям этих метеозлементов в современных условиях на изучаемом водосборе. В параметры СМП внесены соответствующие изменения и сгенерированы ряды прогнозных значений среднесуточной температуры воздуха и суточных слоев осадков продолжительностью 100 лет для условий 2100 г.

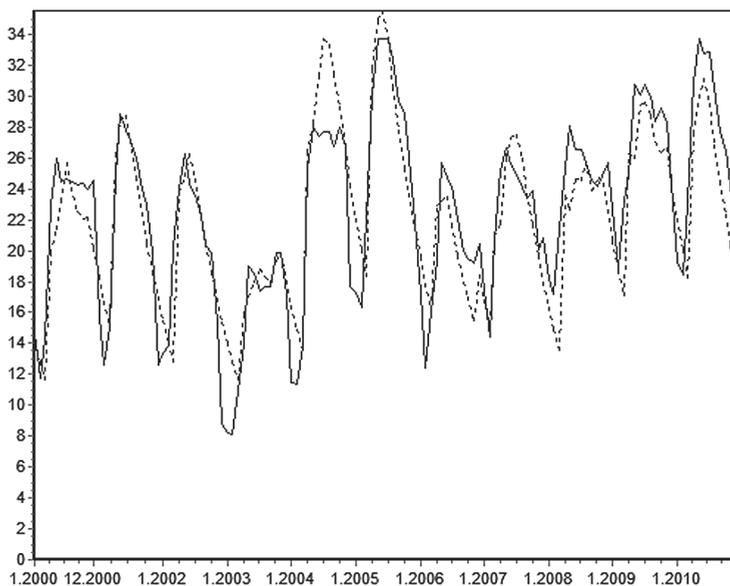


Рис. 4. Рассчитанные (---) и наблюдаемые (—) среднеемесячные слои стока, р. Нева — д. Новосаратовка за период с 2000 по 2010 г.

Таблица 1

Изменения среднеемесячной температуры воздуха и месячных сумм осадков к концу 2100 г. по отношению к современным их значениям

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Осадки, мм/мес.	28,91	20,94	13,61	4,56	7,45	-7,47	-1,59	-9,62	1,51	-2,06	31,51	21,89
Температура воздуха, °С	5,06	6,73	5,84	5,27	2,47	2,36	2,89	3,51	3,56	5,36	5,51	6,27

Следует отметить, что параметры распределения наблюдаемого и рассчитанного по ДС модели годового стока р. Невы удовлетворительно соотносятся между собой (табл. 2), что дает основание для последующего использования ДС модели в решении задачи оценки возможного изменения стока при реализации различных климатических сценариев.

Сгенерированные прогнозные ряды метеорологических элементов также использовались в качестве входа в модель формирования стока. Результатом расчетов явились прогнозные среднеемесячные значения расходов воды (или слоев стока). Значения рассчитанных и наблюдаемых среднегодовых значений осадков, испарения и слоя стока для водосбора Ладожского озера и реки Невы в створе д. Новосаратовка для условий 2100 г. приведены в табл. 2.

На рис. 5 представлены рассчитанные кривые распределения годовых слоев стока в современных условиях и в конце XXI в. Как видно из рисунка и табл. 2, рассчитанные средние значения годового стока составили 271 мм/год для 2010 г. и 254 мм/год для

2100 г. То есть согласно использованному климатическому сценарию, несмотря на существенное увеличение слоя осадков, следует ожидать снижение стока с водосбора Ладожского озера и реки Невы ориентировочно на 6,3 % по отношению к современному периоду. Причиной явится увеличение испарения за счет потепления, которое компенсирует возрастание осадков.

Таблица 2

Наблюденные и рассчитанные по ДС модели элементы водного баланса бассейна р. Невы и Ладожского озера в створе д. Новосаратовка

	Наблюденные	Рассчитанные с использованием реальной метеорологии	Рассчитанные для условий 2100 г.
Осадки, мм/год	654	654	758
Испарение, мм/год		386	504
Сток, мм/год	271	269	254

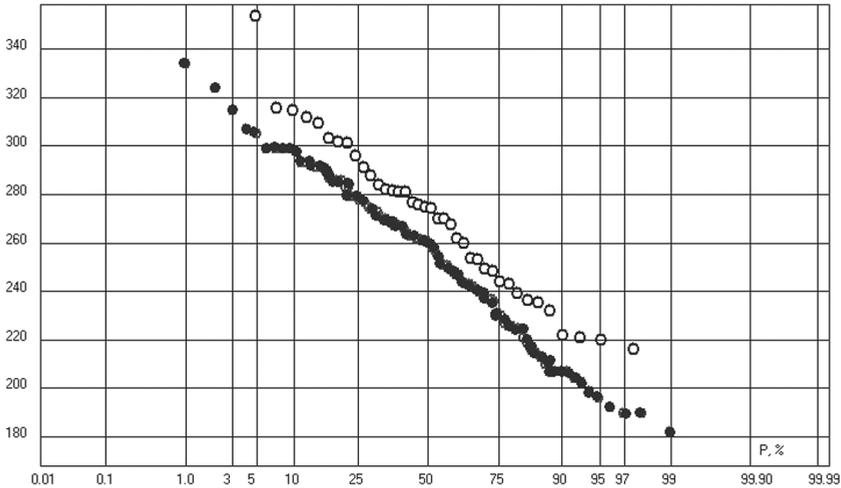


Рис. 5. Кривые распределения наблюдаемых (○) и рассчитанных (●) прогнозных годовых слоев стока для р. Невы — д. Новосаратовка

Заключение

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что предложенный метод прогностической оценки изменений стока с крупного водосбора под воздействием климатических изменений позволяет рассчитать не только общую тенденцию изменения стоковых характеристик, но и оценивать параметры распределения стока в будущем.

Перспективы развития ДС моделирования в области изучения процессов стока с водосбора состоят, прежде всего, в совершенствовании методов детерминированной

оценки процессов стокообразования на различных частях водосбора и в русловой сети. Прогресс в этом вопросе зависит от существенной перестройки и совершенствования системы мониторинга водных объектов, а также проведения специальных натуральных исследований с целью уточнения параметров модели. Перспективы практического использования ДС заключаются в возможности планирования хозяйственной деятельности на водосборе в соответствии с водностью, а также с учетом изменений условий формирования стока, отсутствия или недостатка данных гидрометрических наблюдений.

Литература

1. *Голицын Г.С., Ефимова Л.К., Мохов И.И., Семёнов В.В., Хон В.Ч.* Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI вв. // Изв. РГО, 2002, т. 134, вып. 6, с. 34–45.
2. *Коваленко В.В.* Моделирование гидрологических процессов. — СПб.: Гидрометеиздат, 1993. — 256 с.
3. *Кондратьев С.А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. — СПб.: Наука, 2007. — 255 с.
4. *Кондратьев С.А., Максимов Д.А., Шмакова М.В., Уличев В.И.* Моделирование биогенной нагрузки на водные объекты // Учёные записки РГГМУ, 2014, № 35, с. 165–177.
5. Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. — СПб.: Нестор-История, 2013. — 467 с.
6. *Шмакова М.В.* Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук — СПб.: Гос. гидрол. ин-т., 2000. — 25 с.