

УДК [502.173:556]:51-7

*С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОСНОВА
ПЛАНИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ВОДНЫХ РЕСУРСОВ**

ФГБУН «Институт озераедения Российской академии наук» (ИНОЗ РАН)

*S.A. Kondratyev, M.V. Shmakova***MATHEMATICAL MODELING AS A BASIS FOR PLANNING
SUSTAINABLE USE OF WATER RESOURCES**

Представлена детерминировано-стохастическая моделирующая система, включающая в себя модели генерации рядов метеоэлементов, формирования стока на водосборе, биогенной нагрузки на водные объекты, годового твердого стока притоков, а также гидродинамики водоема. Результаты расчетов представляются в виде параметров распределения среднемесячных и среднегодовых слоев стока, годовой биогенной нагрузки на водный объект, годового твердого стока, а также в виде оценки интенсивности заиления водоема речными наносами при различных гидрометеорологических ситуациях.

Ключевые слова: детерминировано-стохастическое моделирование, биогенная нагрузка, сток, заиление, речные наносы, водохранилище.

In the article a deterministic-stochastic modeling system is presented. It includes models for generation of meteorological series, runoff in the catchment, nutrient load on water bodies, annual solid flow in tributaries, and hydrodynamics of the water body. The results of the calculations are presented in the form of parameters for the distribution of the average monthly and annual runoff, the annual nutrient load on the water body, the annual solid runoff, and also it is presented as silting intensity of the reservoir by river sediments under various hydrometeorological conditions.

Keywords: deterministic-stochastic modeling, nutrient load, runoff, silting, river sediments, reservoir.

Проблемы планирования рационального использования водных ресурсов, вызванные избыточной антропогенной нагрузкой с высокой степенью неоднородности во времени и пространстве, определяют необходимость совершенствования системы мониторинга, методов диагностики и анализа переменных состояния различных природных комплексов. Однако нередко относительно непродолжительные ряды наблюдений не позволяют с достаточной достоверностью как оценить текущее состояние водных объектов и их водосборов, так и проанализировать тенденции изменения их качественных и количественных показателей.

При решении широкого круга прикладных задач, связанных с оценкой и прогнозом стока, выноса взвешенных и растворенных примесей с водосборов, а также с формированием нагрузки на водные объекты, возникает потребность расчета не только средних значений искомых характеристик, но и диапазонов их возможных изменений. Одним из возможных способов решения такого рода задач является использование детерминировано-стохастических (ДС) моделей, включающих

в себя блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов в качестве входа в последующие детерминированные блоки модели, описывающие сток и вынос примесей с водосбора. Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы ДС моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных значений метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем стоковые ряды и тем более ряды измеренных значений выноса примесей с водосбора. Создание такого модельного комплекса полностью отвечает основной задаче прикладной экологии, которая определяется «разработкой принципов рационального использования природных ресурсов на основе сформулированных общих закономерностей организации жизни» [7, с. 320].

В Институте озероведения разработана и практически реализована ДС моделирующая система «погода – сток – биогенная нагрузка – речные наносы – заиление», основанная на комплексе математических моделей генерации рядов метеоэлементов, формирования стока на водосборе, биогенной нагрузки на водные объекты, годового твердого стока притоков, гидродинамики водоема. Первоначальным входом в ДС моделирующую систему являются ряды наблюдений за метеорологическими элементами. Результаты расчетов представляются в виде параметров распределения среднемесячных и среднегодовых слоев стока, годовой биогенной нагрузки на водный объект, годового твердого стока, а также в виде оценки интенсивности заиления водоема речными наносами при различных гидрометеорологических ситуациях. Ниже приведена схема ДС моделирующей системы (рис. 1) и краткое описание моделей, составляющих эту систему.

Стохастическая модель погоды – СМП (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614228 от 09.04.2015 г.) создана под руководством Ю.Б. Виноградова [1, с. 280] и практически реализована в работе [8, с. 7]. Модель разработана в целях обеспечения поступления на вход моделей формирования стока рядов метеорологической информации требуемой продолжительности. Модель состоит из двух основных блоков – оценки параметров СМП и имитационного моделирования суточных рядов метеорологических величин (температуры воздуха, слоев осадков, дефицита влажности воздуха и продолжительности выпадения осадков). Позволяет генерировать ряды метеоэлементов как для современных условий, так и по заданным прогнозным изменениям их средних значений.

Модель формирования стока с водосбора IЛНМ – Institute of Limnology Hydrological Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015 г.) разработана в Институте озероведения РАН [3, с. 76] 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.

Модель формирования биогенной нагрузки на водосборе IЛЛМ – Institute of Limnology Load Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612519 от 27.02.2014 г.) разработана в Институте озероведения РАН на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования выноса биогенных



Рис. 1. Схема ДС моделирующей системы
«погода – сток – биогенная нагрузка – речные наносы – заиление»

веществ с водосборных территорий [3, с. 78], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [11, с. 50]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой нагрузки общим фосфором и общим азотом, сформированной различными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений.

Модель годового твердого стока рек (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014 г.) разработана в Институте озерадения РАН и предназначена для оценки годового твердого стока при недостаточности данных гидрометрических наблюдений за расходами воды и наносов [9, с. 48]. В модели реализовано имитационное моделирование суточных расходов наносов, их пересчет в общий расход наносов и последующая оценка параметров распределения годового твердого стока.

Модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме [10, с. 61] основана на совместном решении уравнений «мелкой воды» в двумерной постановке и аналитической формулы расхода наносов [9, с. 39]. Модель позволяет вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища как в среднем за год, так и с учетом пространственной и временной изменчивости происходящих процессов. Позволяет оценивать изменения течений и заиления водоема при реализации различных прогнозных сценариев, в том числе и сгенерированных с помощью СМП.

ДС моделирование обычно проводится в определенной последовательности:

1. Оценка статистических параметров наблюдаемых рядов метеорологических элементов (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков).
2. Генерирование рядов метеорологических элементов заданной продолжительной длины с пересчетом суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.
3. Моделирование месячных (годовых) слоев стока по гидрологической модели, прошедшей верификацию в изучаемом регионе.
4. Моделирование годовых значений нагрузки по модели биогенной нагрузки, прошедшей верификацию в изучаемом регионе.
5. Моделирование годового твердого стока рек.
6. Оценка параметров распределения значений стока, биогенной нагрузки и твердого стока рек (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).
7. Моделирование гидродинамики и переноса примеси в водоеме.
8. Оценка интенсивности заиления водоема речными наносами с учетом неоднородности во времени и в пространстве.

В настоящее время разработанная моделирующая система используется для решения следующих задач:

- Оценка основных гидрологических характеристик водной системы «водосбор – водоем», биогенной нагрузки и годового твердого стока в современных условиях при недостаточности данных наблюдений. Здесь СМП является генератором метеозлементов для современных условий, на основании которых выполняются расчеты функций распределения стока воды, взвешенных и растворенных примесей, которые невозможно построить на основе существующих данных мониторинга.
- Расчет изменения указанных характеристик при реализации различного рода прогнозных сценариев. Эти сценарии могут выражать изменение условий антропогенных и климатических воздействий на систему «водосбор – водоем». СМП является генератором метеозлементов при измененных их прогнозных значениях.

Ниже приведены примеры использования моделирующей системы в обоих перечисленных направлениях ДС моделирования.

Моделирование при отсутствии или недостаточности данных наблюдений

Биогенная нагрузка на Онежское озеро [5, с. 53]. При выполнении расчетов по модели оценка параметров СМП проводилась на основании данных наблюдений за метеорологическими элементами на метеостанциях Сортавала, Петрозаводск и Вытегра за период 1950–2013 гг. Согласно полученным параметрам СМП сгенерированы ряды суточных значений метеорологических элементов – температуры воздуха и слоев осадков – продолжительностью 500 лет. По гидрологической модели рассчитаны слои месячных и годовых слоев по реальным и сгенерированным рядам метеорологических элементов, а также годовые значения нагрузки общим фосфором и общим азотом со стороны водосбора. На рис. 2 приведены кривые распределения годовых слоев стока для водосбора Онежского озера, рассчитанных по реальной и сгенерированной метеорологии.

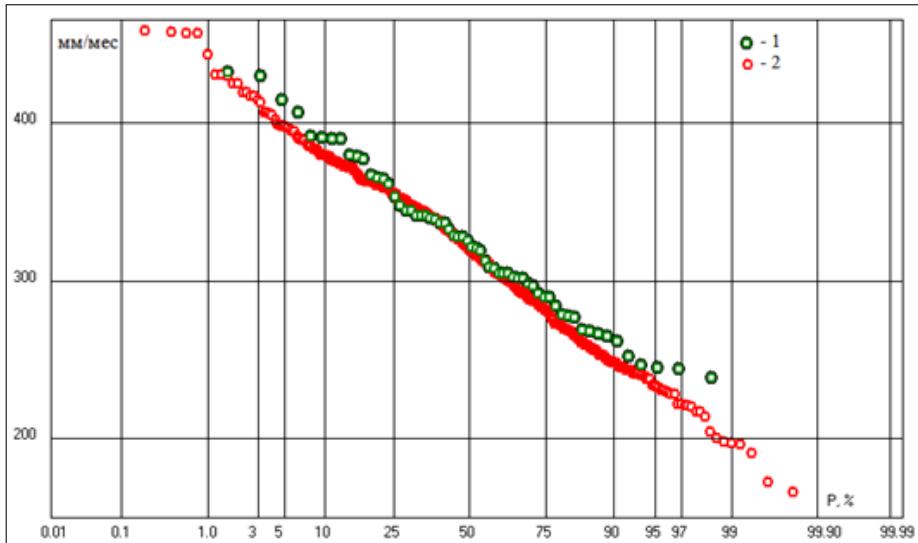


Рис. 2. Распределение рассчитанных по реальной (1) и сгенерированной метеорологии (2) годовых слоев стока для Онежского озера

В табл. 1 представлено сравнение результатов расчета биогенной нагрузки 50 %-й обеспеченности на основе ДС моделирования и по натурным данным, осредненным за период наблюдений (2007–2014 гг.) [5, с. 53].

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования с данными натурных наблюдений

Диффузная нагрузка, сформированная на водосборе, т/год	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$
Рассчитанная по ДС моделирующей системе	669	11 981
Рассчитанная по данным наблюдений ИВП Севера КарНЦ РАН	645	12 029

Биогенная нагрузка на Финский залив с частного водосбора [6, с. 367]. Оценка параметров СМП проводилась на основании данных наблюдений за метеорологическими элементами на болотной станции ГГИ Ламмин-Суо (Ленинградская область) за период 1983–2010 гг. На основании полученных параметров СМП сгенерированы ряды суточных значений метеорологических элементов – температуры воздуха и слоев осадков – продолжительностью 100 лет. В 2013 г. на 17 малых притоках залива, расположенных на изучаемой территории и занимающих площадь ~4300 км², проведена серия натурных измерений и рассчитан вынос фосфора с водосборов этих рек. На основе полученных данных проведена калибровка модели ILLM, после чего расчеты выполнялись уже для всей площади частного водосбора Финского залива. Результаты ДС моделирования стока, фосфорной нагрузки и ее природной (фоновой) составляющей (табл. 2) показали, что в настоящее время среднее значение фосфорной нагрузки на залив с его частного водосбора составляет 285 т/год (без учета точечных сбросов), ее природная

составляющая – 84,2 т/год при среднем квадратичном отклонении соответственно 25,1 и 13,3 т/год.

Таблица 2

Средние значения (X_{cp}), средние квадратичные отклонения (s) и значения различной обеспеченности ($X_{\%}$) стока и фосфорной нагрузки на Финский залив с российского частного водосбора

	X_{cp}	s	$X_{1\%}$	$X_{5\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
Сток, мм/год	304	57,5	438	399	343	265	209	170
Нагрузка, т Р/год	285	25,1	343	326	302	268	244	227
Природная составляющая нагрузки, т Р/год	84,2	13,2	115	106	93	75	62	53

Оценка последствий климатических изменений

Для оценки возможных изменений стока в будущем использовался детерминированный сценарий климатических изменений, разработанный для восточной части Балтийского региона [2, с. 34]. 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. Сгенерированные прогнозные ряды метеорологических элементов поступили на вход в модель формирования стока. Результатом расчетов явились прогнозные среднемесячные значения расходов воды.

Формирование стока с водосбора Ладожского озера и р. Невы [4, с. 24]. Оценка параметров СМП проведена по данным наблюдений трех метеостанций, расположенных на территории водосбора р. Невы и Ладожского озера, – Сортавала, Петрозаводск и Тихвин – для периода с 1970 по 2010 г.

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. 3. На рис. 3 представлены рассчитанные кривые распределения годовых слоев стока в современных условиях и в конце XIX в.

Таблица 3

Наблюдаемые и рассчитанные по ДС модели значения элементов водного баланса бассейна р. Невы и Ладожского озера в створе д. Новосаратовка

Элементы водного баланса	Наблюдаемые	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

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 р. Невы ориентировочно на 6,3 % по отношению к современному периоду. Возможной причиной явится увеличение испарения за счет потепления, которое компенсирует возрастание осадков.

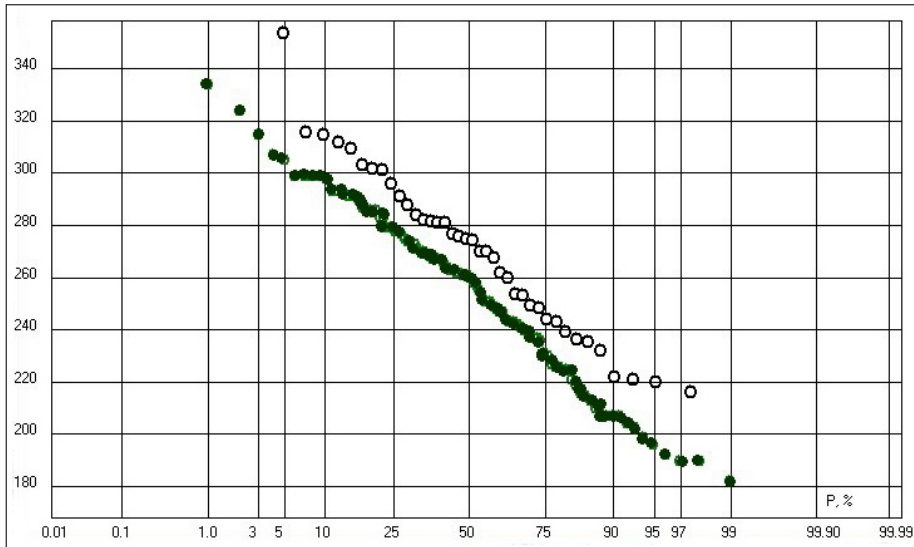


Рис. 3. Кривые распределения наблюдаемых (○) и рассчитанных (●) прогнозных годовых слоев стока для р. Невы – д. Новосаратовка

Формирование стока и биогенной нагрузки на водохранилище Сестрорецкий Разлив. Заиление речными наносами. Оценка параметров СМП проводилась на основании данных наблюдений за метеорологическими элементами, осредненными по двум метеостанциям – г. Выборг и г. Санкт-Петербург – за период 1970–2010 гг.

Рассчитанные средние значения годового стока (табл. 4) составили 374 мм/год (4,95 м³/с) за период 2000–2014 гг. и 428 мм/год для 2100 г. То есть согласно использованному климатическому сценарию существенное увеличение слоя осадков приведет к возрастанию стока с водосбора Сестрорецкого Разлива на 14 % по отношению к современному периоду. Природная (фоновая) фосфорная нагрузка на водоем со стороны водосбора повысится на 7 % и составит 13,64 т/год.

Таблица 4

Средние значения (X_{cp}), средние квадратичные отклонения (s) и значения различной обеспеченности ($X_{\%}$) стока и фосфорной нагрузки на Сестрорецкий Разлив с российского частного водосбора

	X_{cp}	s	$X_{1\%}$	$X_{3\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
Настоящее время								
Сток, мм/год	392	50,61	510	476	426	358	308	274
Нагрузка, т Р/год	15,65	1,68	19,56	18,42	16,78	14,52	12,88	11,74
Природная нагрузка, т Р/год	12,7	1,31	15,75	14,86	13,58	11,82	10,54	9,65
Прогноз								
Сток, мм/год	428	48,84	542	509	461	395	347	314
Нагрузка, т Р/год	16,86	1,63	20,66	19,55	17,95	15,77	14,17	13,06
Природная нагрузка, т Р/год	13,64	1,26	16,58	15,72	14,48	12,80	11,56	10,70

Прогнозные значения годового твердого стока $R_{\text{ср.прогноз}}$ р. Сестры составили 2811 т/год, р. Черной – 1261 т/год, что почти на 15 % превышает наблюдаемый годовой твердый сток $R_{\text{ср.набл}}$ (табл. 5). Учитывая продолжительный период заиления Сестрорецкого Разлива именно речными наносами, такое увеличение годового твердого стока незначительно скажется на интенсивности заиления водохранилища речными наносами.

Таблица 5

Прогнозная скорость заиления
речными наносами Сестрорецкого Разлива δ , мм/год

$R_{\text{ср.набл}}$ т/год	$R_{\text{ср.прогноз}}$ т/год	$\delta_{\text{набл.}}$ мм/год	$\delta_{\text{прогноз}}$ мм/год
3500	4072	0,1	0,12

Результаты расчетов по модели гидродинамики и транспорта наносов показали, что увеличение стока на 14 % приведет к увеличению скоростей течений и, как следствие, к расширению области циркуляции речных наносов в акватории. Как в межень, так и в половодье более насыщенными наносами оказываются северная и центральная части водохранилища, частично наносы достигают и южной части Сестрорецкого Разлива.

Выводы. Построена и практически реализована детерминировано-стохастическая моделирующая система, основанная на комплексе математических моделей генерации рядов метеорологических элементов, формирования стока на водосборе, биогенной нагрузки на водные объекты, твердого стока притоков, гидродинамики и переноса примесей в водоеме. Выполненные с использованием системы расчеты показывают, что ДС моделирование – это эффективный инструмент оценки параметров распределения стока, транспорта речных наносов, выноса химических веществ с водосборов, интенсивности заиления водохранилищ речными наносами в условиях ограниченности данных натуральных наблюдений. Таким образом, удовлетворяется запрос прикладных инженерных задач рационального водопользования, заключающийся в потребности расчета не только средних значений искомых характеристик, но и диапазонов их возможных изменений, включающих реакцию на экстремальные гидрометеорологические воздействия.

Перспективным направлением использования разработанной модельной системы являются прогностические оценки последствий антропогенных и климатических воздействий на характеристики системы «водосбор – водоем». Дальнейшее теоретическое развитие ДС моделирования в области планирования рационального использования водных ресурсов состоит прежде всего в совершенствовании методов детерминированного описания процессов в системе «водосбор – водоем» и в значительной степени зависит от существенной перестройки и совершенствования системы мониторинга водных объектов, а также проведения специальных натуральных исследований в целях уточнения структуры модели и ее параметров. Практическое использование ДС моделей связано с возможностью планирования хозяйственной деятельности на водосборе в соответствии с экстремальными условиями водности, а также при отсутствии или недостатке данных гидрометрических наблюдений.

Литература

1. *Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 312 с.
2. *Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI / Г.С. Голицын, Л.К. Ефимова, И.И. Мохов и др. // Изв. РГО. 2002. Т. 134, вып. 6. – С. 34–45.*
3. *Кондратьев С.А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. – СПб.: Наука, 2007. – 255 с.
4. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Математическое моделирование стока реки Невы в условиях возможного изменения климата // Учен. зап. РГМУ. 2016, № 42. – С. 24–32.
5. *Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова, Е.Г. Маркова и др. // Изв. Русск. геогр. общ-ва. 2016, № 5. – С. 53–64.*
6. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Детерминированно-стохастическое моделирование как инструмент оценки стока и выноса биогенных веществ с водосборов при недостатке данных натуральных наблюдений // Соврем. проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхн. вод. Мат-лы научн. конф. с междунар. участием. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. ФГБУ «Гидрохимический институт», 2015. – С. 367–371.
7. *Уваров С.А.* Принципы экологического обеспечения логистики: материалы 10-й Международной научно-практической конференции «Логистика – евразийский мост» (14–16 мая 2015 г., Красноярск). – Красноярск: Краснояр. гос. аграрн. ун-т, 2015. – С. 320–325.
8. *Шмакова М.В.* Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования характеристик стока: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2000. – 25 с.
9. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. – СПб.: Лема, 2013. – 142 с.
10. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А., Маркова Е.Г.* Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) // Учен. зап. РГМУ. 2016, № 44. – С. 61–69.
11. *HELCOM Baltic Sea Action Plan.* Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. – 103 p.