

ЭКОЛОГИЯ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

С.А. Кондратьев, Д.А. Максимов, М.В. Шмакова, В.И. Уличев

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

S.A. Kondratyev, D.A. Maximov, M.V. Shmakova, V.I. Ulichev

MODEL FOR CALCULATION OF NUTRIENT LOAD ON AQUATIC SYSTEMS

На основе разработанных и апробированных моделей сформирована детерминировано-стохастическая модель стока и биогенной нагрузки на водные объекты. В результате проведенного моделирования выполнена оценка параметров функций распределения значений стока с Российской территории частного водосбора Финского залива и нагрузки общим фосфором и общим азотом на залив с водосбора, неконтролируемого системой мониторинга Росгидромета.

Ключевые слова: детерминировано-стохастическая модель, сток, биогенная нагрузка.

Deterministic-stochastic model of runoff and nutrient loading on water bodies was generated on the basis of developed and tested sub-models. As a result of simulation an estimation of distribution functions parameters for runoff from immediate unmonitored catchment, and total phosphorus and total nitrogen loading on the Gulf of Finland was made.

Key words: deterministic and stochastic model, runoff, nutrient load.

Эвтрофирование водных объектов (пресноводных и солоноводных), ухудшение качества их вод в значительной степени зависят от внешней биогенной нагрузки со стороны водосбора. Необходимым условием создания системы охраны и рационального использования водного объекта, а также управления его ресурсами является наличие математической модели, связывающей нагрузку от различных источников на водосбор с нагрузкой на водоем. Отсутствие такой модели делает практически невозможным решение задачи по научно-обоснованному выбору путей снижения нагрузки за счет изменений интенсивности каких-либо источников загрязнения, а также достижения заданных характеристик качества воды в водоеме и заданного экологического статуса.

Внешняя нагрузка на водный объект — количество вещества, поступившего в водоем за рассматриваемый интервал времени и, возможно, пересчитанное на единицу площади акватории или объем водной массы. Нагрузка является постоянно действующим фактором, определяющим качество воды в водоеме, влияющим на химический состав донных отложений и гидробиологические процессы. Для решения

задач, связанных с оценкой и прогнозом изменения биогенной нагрузки на водоемы, могут использоваться модели следующих основных разновидностей: детерминированные, стохастические и детерминировано-стохастические. Детерминированные модели, наиболее распространенные в настоящее время [3, 5], основаны на физически обоснованном описании основных изучаемых процессов и определяют однозначную связь между входом и выходом модели. Стохастические (вероятностные) модели учитывают вероятностную структуру процессов. В этом случае входные величины и некоторые параметры модели представляются параметрами распределения плотности вероятности. Одним из перспективных направлений моделирования в рассматриваемой области является создание и развитие детерминировано-стохастических (ДС) моделей, объединяющих возможности как детерминированных, так и стохастических моделей.

Целью исследований, результаты которых приведены в настоящей статье, являлось:

- построение ДС модели формирования биогенной нагрузки на основе разработанных ранее детерминированных и стохастических компонентов;
- оценка современной биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с водосбора, неконтролируемой существующей сетью мониторинга Росгидромета, и выявление вклада различных источников загрязнения в биогенную нагрузку;
- оценка изменения стока и биогенной нагрузки на водосборе Финского залива под влиянием возможных климатических изменений.

ДС моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты основано на использовании гидрологической модели, модели биогенной нагрузки и стохастической модели погоды (СМП), которая обеспечивает метеорологическими рядами гидрологическую модель (рис. 1).



Рис. 1. Схема ДС моделирования стока и биогенной нагрузки

В рамках ДС моделирования стока и биогенной нагрузки решаются следующие задачи:

1. Оценка параметров СМП для наблюдаемых рядов метеорологических элементов (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков).
2. Имитационное моделирование рядов метеорологических элементов продолжительной длины.
3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.
4. Моделирование месячных (годовых) слоев стока по гидрологической модели.
5. Моделирование годовых значений биогенной нагрузки (фосфор, азот) по модели биогенной нагрузки.
6. Оценка параметров распределения годовых значений биогенной нагрузки — среднего и среднего квадратичного отклонения.

Итогом ДС моделирования в данном случае является набор кривых распределения годовых значений стока и биогенной нагрузки.

Стохастическая модель погоды — СМП

Для оценки возможных изменений параметров распределения гидрологических характеристик разработана и практически реализована стохастическая модель погоды [9]. Модель служит основой для ДС моделирования характеристик стока, обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных математических моделей формирования стока.

В основе стохастического моделирования погоды лежит метод Монте-Карло. При моделировании используется гипотеза о функционально-нормальном законе распределения метеорологических величин, которая позволяет использовать хорошо разработанный для нормального закона распределения корреляционный аппарат. При разработке алгоритмов модели также использовалась гипотеза стационарности случайных процессов и однородности и изотропности случайных полей. Моделирование метеорологических элементов 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.

Структура СМП приведена на рис. 2. На расчетной точке (или метеостанции) определяется факт выпадения осадков на текущие сутки, который зависит от ситуации на соседних расчетных точках (метеостанциях) и наличия либо отсутствия осадков в минувший день на данной расчетной точке. В случае, если осадки есть, моделируется слой осадков с учетом слоя на соседних расчетных точках.

Следующим этапом моделирования является определение суточной температуры воздуха и суточной относительной влажности воздуха. Если осадки на данной расчетной точке имели место, то при моделировании указанных метеорологических элементов используются параметры, полученные для дней с осадками и для дней без осадков. При моделировании температуры воздуха и относительной влажности воздуха учитывается временная, пространственная и пространственно-временная корреляция.

Моделирование завершается пересчетом относительной влажности воздуха в дефицит влажности воздуха.

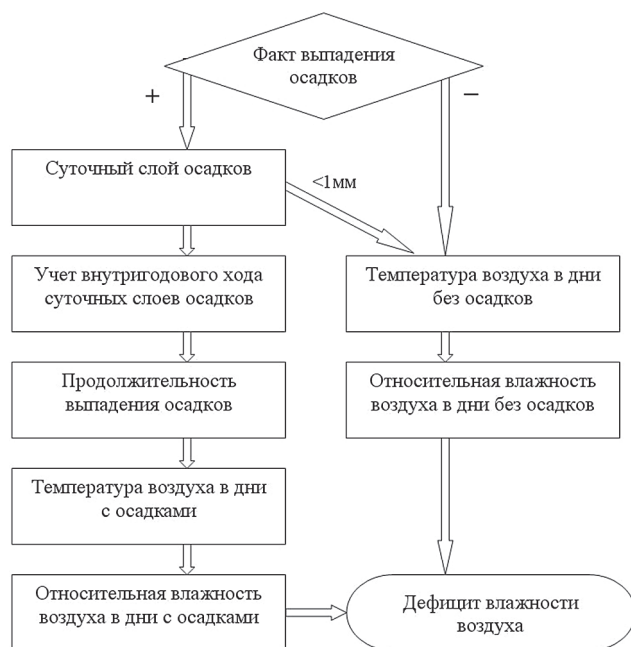


Рис. 2. Схема СМП

Модель формирования стока — ILHM

Гидрологическая модель формирования стока с водосбора ILHM (Institute of Limnology Hydrological Model) разработана в Институте озераведения РАН [8, 3] 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 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. Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, определяются в зависимости от озёрности, т.е. доли площади водоемов в общей площади водосбора. В модели также 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) [8, 7] и Финляндии (водосборы рек Мустайоки и Харайоки) [4]. В настоящее время модель ILHM успешно применяется для решения задач оценки воздействия климатических изменений на сток рек северо-запада РФ, а также в качестве основы для расчетов выноса биогенных веществ с водосборов. Схема модели представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема модели ILHM, описывающей формирование стока на водосборе и динамику уровня водоема

Модель биогенной нагрузки — ILLM

Модель формирования биогенной нагрузки на водные объекты (ILLM — Institute of Limnology Load Model) разработана на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования стока и выноса биогенных веществ с водосборных территорий, поступления биогенных веществ в водоемы [3, 5], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [12]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой биогенной нагрузки, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. Модель ориентирована на существующие возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Росгидромета, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах РФ.

На рис. 4 приведена общая структура усовершенствованной математической модели выноса общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) и общего азота ($N_{\text{общ}}$) с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоем. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосбор, позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью. Конечным итогом моделирования является количественная оценка биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора и отдельных ее составляющих.

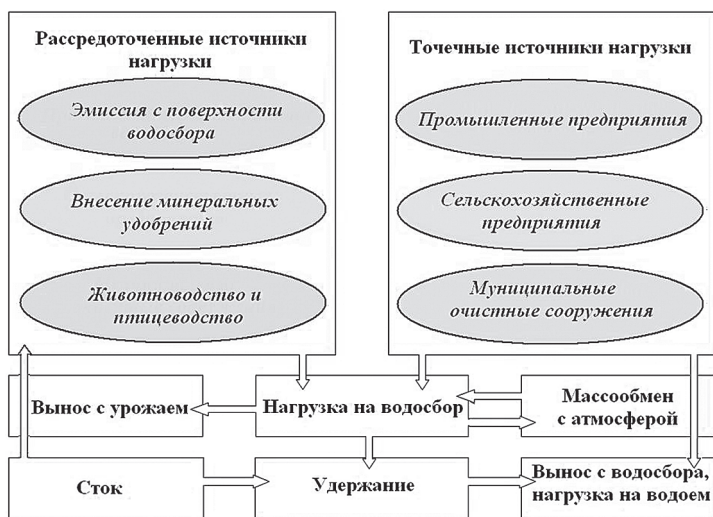


Рис. 4. Схема модели ILLM, описывающей вынос биогенных веществ с водосбора и формирование внешней биогенной нагрузки на водоемы

Для определения гидрологических характеристик водосбора (слоя стока, расхода воды) заданной вероятности превышения могут быть использованы их аналитические кривые распределения, например, трехпараметрическое гамма-распределение, построенные по данным многолетних наблюдений на реках исследуемого региона. Альтернативным способом определения гидрологических характеристик, влияющих на формирование биогенной нагрузки на водные объекты, является использование гидрологической модели (например, ИЛМ, описанной выше), позволяющей рассчитывать слой стока и расходы воды в зависимости от конкретных гидрометеорологических параметров.

Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных в Северо-Западном регионе России на водосборах рек Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка [6]. По результатам выполнения проекта EU BaltHazAR II компонент 2.2 «Создание потенциала в рамках экологического мониторинга для получения данных загрязнения из различных источников, например, для HELCOM PLCs» (2012) сделан вывод о том, что «модель ILLM может быть использована для приближенной оценки биогенной нагрузки на Балтийское море с неизученных и малоизученных водосборов России».

Расчет биогенной нагрузки на Финский залив с Российской части водосбора

Финский залив — одна из наиболее эвтрофированных акваторий Балтийского моря. На долю Российской Федерации в 1997–2003 гг. приходилось $> 3/4 P$ и $> 2/3 N$, поступающих с водосбора в Финский зал. [11] В ноябре 2007 г. на сессии Хельсинкской комиссии ХЕЛКОМ принят План действий по Балтийскому морю ПДБМ [13], который представляет собой долгосрочную стратегию оздоровления Балтийского моря. Для выполнения рекомендаций ПДБМ необходимо иметь научнообоснованную

оценку биогенной нагрузки на Финский залив как на настоящий момент, так и на перспективу. Расчеты с использованием ДС моделирования выполнялись в первую очередь для частного водосбора Финского залива (рис. 5), вынос биогенных веществ с которого не контролируется в рамках государственного мониторинга (Германова, Фрумин, 2012). Результаты расчетов биогенной нагрузки на Финский залив с его частного водосбора, выполненных ранее по детерминистической модели, представлены в работах [2, 6].



Рис. 5. Схема частного водосбора Финского залива, не охваченного сетью наблюдений мониторинга Росгидромета

Оценка параметров СМП

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 рис. 6–11 приведены аппроксимации годового хода и кривые распределения вероятностей некоторых метеорологических элементов. Коэффициент корреляции между смежными членами ряда нормированных значений температуры воздуха составил 0,7.

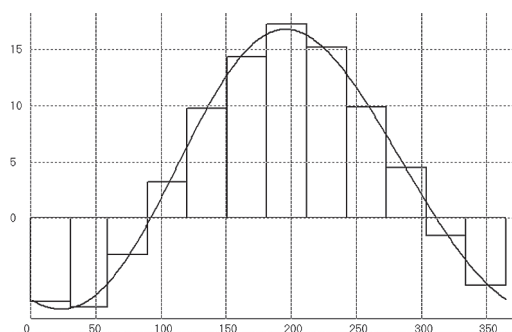


Рис. 6. Аппроксимация годового хода среднемесячной температуры

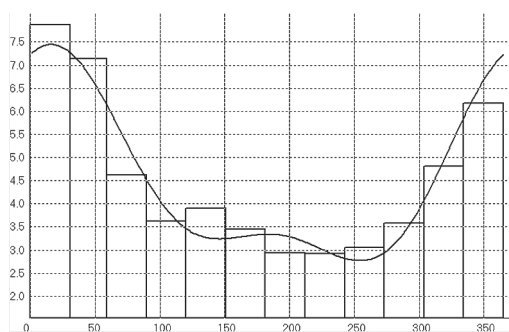


Рис. 7. Аппроксимация годового хода среднего квадратичного отклонения температуры воздуха

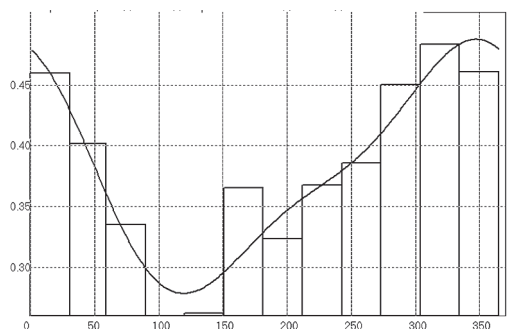


Рис. 8. Аппроксимация годового хода вероятности выпадения осадков

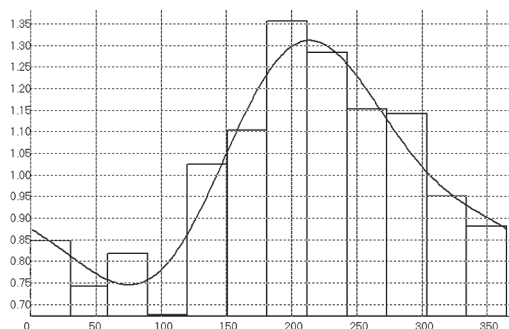


Рис. 9. Аппроксимация годового хода средней относительной величины выпавших осадков

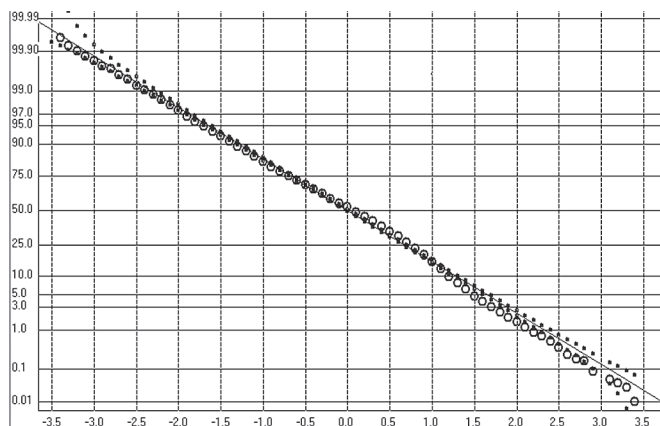


Рис. 10. Кривая распределения вероятностей нормированных значений температуры воздуха

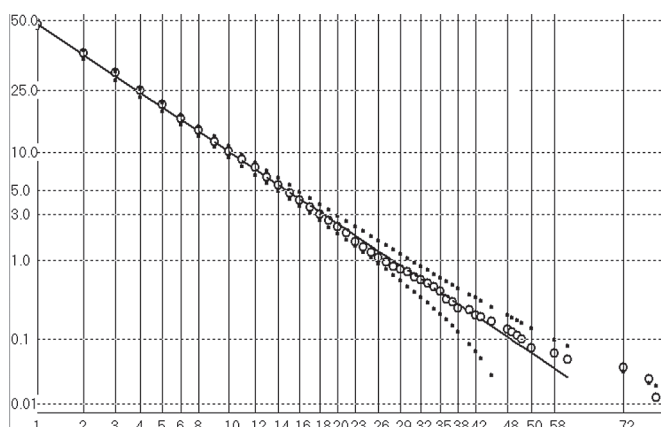


Рис. 11. Кривая распределения вероятностей нормированных и нормализованных слоев осадков без условий

Моделирование рядов метеорологических элементов, годовых слоев стока и биогенной нагрузки

На основании полученных параметров СМП сгенерированы ряды суточных значений метеорологических элементов (температуры воздуха и слоев осадков) продолжительностью 100 лет. По гидрологической модели были рассчитаны слои годового стока по реальной метеорологии и сгенерированным метеорологическим рядам. На рис. 12 приведены кривые распределения годовых слоев стока для частного водосбора Финского залива, а в табл. 1 — параметры распределения годовых слоев стока, полученных по реальным и сгенерированным метеорологическим рядам.

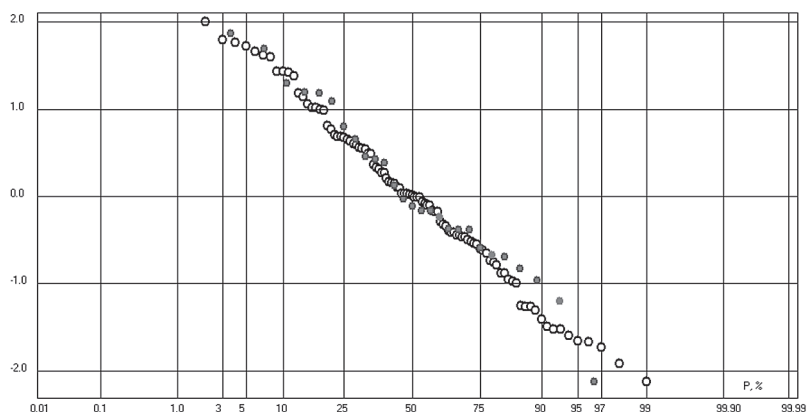


Рис. 12. Кривые распределения годовых слоев стока для частного водосбора Финского залива для реальной метеорологии (•) и сгенерированным метеорологическим рядам (o)

Таблица 1

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока, мм год⁻¹

Стоки	Среднее	Среднее квадратичное отклонение
Слои стока по реальным метеорологическим рядам	300	60
Слои стока по сгенерированным метеорологическим рядам	304	58

Как видно из табл. 1, параметры распределения годового стока, рассчитанного по сгенерированным метеорологическим рядам, хорошо соответствуют параметрам распределения годового стока, вычисленного по наблюдаемой метеорологии. Таким образом, полученные по СМП метеорологические ряды могут служить основой для уточнения параметров распределения значений биогенной нагрузки, прежде всего, при недостаточности данных наблюдений за стоком и оценки параметров распределения при изменении условий формирования стока на водосборе.

В табл. 2 представлены результаты ДС моделирования стока и биогенной нагрузки на Финский залив с частного водосбора, рассчитанные по данным об интенсивности источников поступления биогенных веществ в 2010–2012 гг. Из приведенных данных следует, что существенное увеличение нагрузки приходится на многоводный период, что объясняется прямой связью величин биогенной нагрузки и стока.

Таблица 2

Параметры распределения годовых слоев стока и биогенной нагрузки, рассчитанные по фактическим метеорологическим параметрам (среднее – $\bar{X}$ среднее квадратичное отклонение – σ и значения функции различной обеспеченности)

	$\bar{X}$	σ	$X_1\%$	$X_5\%$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
Слои стока, мм год ⁻¹	304	58,0	439	400	343	265	208	169
Нагрузка $P_{\text{общ}}$, т год ⁻¹	185	5,835	198	194	192	189	181	177
Нагрузка $N_{\text{общ}}$, т год ⁻¹	2296	111	2554	2478	2437	2370	2222	2154

Прогноз изменения стока и биогенной нагрузки на водосборе Финского залива под влиянием возможных климатических изменений

Основой прогноза годового стока и годовых значений биогенной нагрузки послужили сценарии изменения климата, представленные на сайте ФГБУ Институт глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН (<http://climatechange.igse.ru/>). В качестве исходного сценария приняты расчеты прогнозной климатической модели СССта (сценарий А2а) для северо-запада России, согласно которым в рассматриваемом регионе к 2080 г. ожидается увеличение среднегодовой температуры на 2°С и увеличение суточного слоя осадков на 1 мм (т.е. 365 мм год⁻¹, что крайне маловероятно).

На рис. 13 приведены рассчитанные годовые слои стока по сгенерированным метеорологическим рядам с прогнозными и фактическими параметрами. Длина сгенерированного ряда метеорологических элементов составила 100 лет.

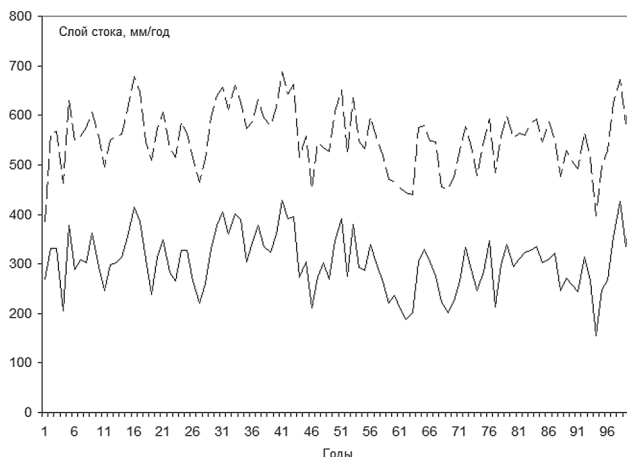


Рис. 13. Рассчитанные годовые слои стока по сгенерированным метеорологическим рядам с прогнозными на 2080 г. (— —) и фактическими (—) параметрами

В табл. 3 приведены параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока и значений биогенной нагрузки при однообразной хозяйственной деятельности на водосборе по сгенерированным метеорологическим рядам с прогнозными значениями параметров.

Таблица 3

Параметры распределения годовых слоев стока и биогенной нагрузки $N_{\text{общ}}$, рассчитанные по прогнозным метеорологическим параметрам на 2080 г.

	$\bar{X}$	σ	$X_{1\%}$	$X_{5\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
Слой стока, мм год ⁻¹	556	63.5	704	661	599	513	451	408
Нагрузка $P_{\text{общ}}$, т год ⁻¹	210	6.379	225	221	214	206	200	195
Нагрузка $N_{\text{общ}}$, т год ⁻¹	2778	121	3061	2978	2860	2697	2578	2496

На рис. 14 представлены кривые распределения вероятностей значений нагрузки $P_{\text{общ}}$, полученные с использованием как прогнозных, так и фактических параметров.

По результатам моделирования стока выбранный климатический сценарий можно считать экстремальным, так как его реализация приведет к возрастанию годового стока на 83 % относительно современного значения, что, как уже отмечалось выше, маловероятно. Из сказанного, кстати, следует, что результаты моделирования стока и выноса примесей могут являться средством оценки «разумности» климатических сценариев.

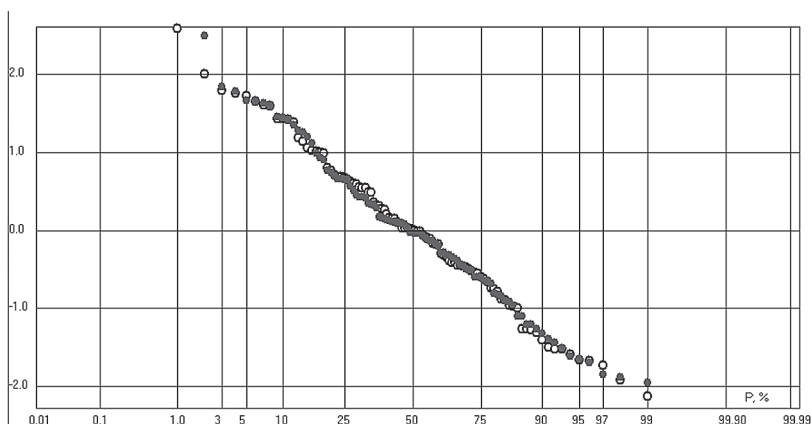


Рис. 14. Кривые распределения нормированных значений $P_{\text{общ}}$ по сгенерированным метеорологическим рядам с прогнозными на 2080 г. (•) и фактическими (о) параметрами

Рассчитанное возрастание биогенной нагрузки на Финский залив с Российской части частного водосбора не столь существенно по сравнению со стоковыми характеристиками. С увеличением среднегодовой температуры воздуха и суточных слоев осадков к 2080 г. среднее и среднее квадратичное отклонение годовых значений нагрузки $P_{\text{общ}}$ увеличатся соответственно на 14 и 1 %, $N_{\text{общ}}$ — на 22 и 1 % относительно современных значений.

Очевидно, что хозяйственная деятельность на водосборе, формирующая поступление биогенных веществ в водный объект, должна регламентироваться в зависимости от водности года. Маловодному периоду соответствует годовой сток обеспеченностью 75 % и ниже, многоводному периоду — 25 % и выше. Отсутствие или недостаток объективных гидрометрических наблюдений на больших водосборах затрудняет оценку характеристик стока и, как следствие, оценку биогенной нагрузки на водный объект. Однако методы ДС моделирования позволяют оценить значения стока и биогенной нагрузки необходимой обеспеченности.

Заключение

В ходе проведения выполненных работ получены следующие основные результаты.

1. На основе разработанных и ранее апробированных компонентов сформирована ДС модель стока с водосбора и биогенной нагрузки на водные объекты.
2. В результате проведенного ДС моделирования выполнена оценка параметров функции распределения значений нагрузки $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ на Финский залив с Российского частного водосбора, не контролируемого системой мониторинга Росгидромета.
3. Показана возможность использования результатов ДС моделирования в качестве индикатора «разумности» климатических сценариев.

Перспективы развития ДС моделирования в области изучения процессов стока, выноса примесей с водосбора и формирования внешней нагрузки на водоемы состоят, прежде всего, в совершенствовании методов детерминированной оценки выноса примесей с водосбора и в русловой сети. Прогресс в этом вопросе зависит от существенной перестройки и совершенствования системы мониторинга водных объектов, а также проведения специальных натурных 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. *Германова А.В., Фрумин Г.Т.* Поступление биогенных элементов в Балтийское море со стоком трансграничных рек. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 24, с. 100–106.
2. *Кондратьев С.А.* Оценка биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с российской части водосбора. // Водные ресурсы, 2011, т. 38, № 1, с. 56–64.
3. *Кондратьев С.А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. — СПб.: Наука, 2007. — 255 с.
4. *Кондратьев С.А., Арвола Л., Хакала И., Алябина Г.А., Маркова Е.Г.* Оценка стока воды, выноса фосфора и органического вещества с малых водосборов Северо запада России и Финляндии (по данным математического моделирования). // Известия Русского Географического Общества, 2003, т. 135, вып. 6, с. 29–36.
5. *Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю.* Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). — СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2010. — 116 с.
6. *Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г.* Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты. // Региональная экология, 2011, 3–4, с. 50–59.
7. *Кондратьев С.А., Назарова Л.Е., Бовыкин И.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г.* Водный режим водосбора Онежского озера под воздействием изменений климата. // Изв. РГО, 2008, т. 140(3), с. 21–26.
8. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера). // Тр. XII съезда РГО, 2005, т. 6, с. 99–104.
9. *Шмакова М.В.* Стохастическая Модель Погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. Спец. 11.00.07 / Гос. гидрол. ин-т. — СПб., 2000. — 25 с.
10. BaltHazAR II project. Component 2.2: Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e.g. HELCOM pollution load compilations. Testing the nutrient load model for the Luga river. — SYKE, Helsinki, Finland, 2012. — 29 p.
11. Eutrophication in the Baltic Sea. // Baltic Sea Environment Proceedings, No 115B. — Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2009. — 148 p.
12. Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). — HELCOM Publ., Helsinki, Finland, 2005. — 80 p.
13. HELCOM Baltic Sea Action Plan. — HELCOM Publ., Helsinki, Finland, 2007. — 103 p.