УДК 556.5+502

© *С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова*
Институт озероведения РАН, г. Санкт-Петербург
kondratyev@limno.org.ru

ДЕТЕРМИНИРОВАННО-СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ ВОДОСБОР-ВОДОЕМ

Статья поступила в редакцию 16.03.2018, после доработки 03.05.2018.

Разработана детерминированно-стохастическая моделирующая система, описывающая массоперенос в системе водосбор-водоем. Компонентами системы являются стохастическая модель погоды, модель формирования стока на водосборе, модель выноса с водосбора растворенных примесей, формирующих внешнюю нагрузку на водоем, модель для расчета годового твердого стока рек, а также модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме. В настоящее время моделирующая система эффективно используется при решении задач количественной оценки абиотических процессов в системе водосбор-водоем в условиях дефицита данных натурных наблюдений, а также прогноза воздействия возможных климатических изменений на изучаемые водные объекты. В условиях недостатка данных натурных наблюдений стохастическая модель погоды используется в качестве генератора продолжительных рядов метеорологических величин (осадков и температуры воздуха). Полученные ряды поступают на вход детерминированных моделей, а итогом моделирования являются не только конкретные значения искомых величин, но и параметры их функции распределения. Также рассчитываются параметры функции распределения твердого стока и характеристики массопереноса на акватории для различных ситуаций, сформированных экстремальными метеоусловиями. При оценке воздействия возможных климатических изменений на изучаемые процессы по климатическому сценарию определяются прогнозные значения осадков и температуры воздуха на момент окончания прогноза. Эти значения вводятся в стохастическую модель погоды вместо современных значений и генерируются соответствующие прогнозные ряды входных величин для детерминированных моделей. Результат расчета — функции распределения искомых величин на момент окончания климатического прогноза.

Ключевые слова: водосбор, биогенная нагрузка, наносы, водохранилище, климат, прогноз.

S. A. Kondratyev, M. V. Shmakova
Institute of Limnology RAS, St.-Petersburg, Russia

A DETERMINISTIC-STOCHASTIC MODELING OF MASS TRANSFER IN THE CATCHMENT-RESERVOIR SYSTEM

Received 16.03.2018, in final form 03.05.2018.

A deterministic-stochastic modeling system describing mass transfer in the catchment-reservoir system is developed. The components of the system are a stochastic weather model, a runoff model in the catchment area, a model for the removal of dissolved impurities in catchment that form an external load on the reservoir, a model for assessment the annual solid flow of rivers, and a hydrodynamic model of flows and impurity transport in the reservoir. Currently, the modeling system is effectively used in solving problems of assessment of abiotic processes in the catchment- reservoir system in the conditions of a lack of field observations, as well as forecasting the impact of possible climate changes on the studied water bodies. In the lack of field observations data, the stochastic weather model is used as a generator of long series of meteorological parameters (precipitation and air temperature). The obtained series are entered in deterministic models, and the result of the simulation is not only the values of required quantities, but also the parameters of their distribution function. Also, the distribution functions of the solid runoff and the characteristics of mass transfer in the water area are calculated for different situations formed by extreme weather conditions. In task of assessing the impact of possible climate changes on the studied processes, predicted values of precipitation and air temperature are determined

Ссылка для цитирования: *Кондратьев С. А., Шмакова М. В.* Детерминированно-стохастическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоем // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 2. С. 55—65.

For citation: *Kondratyev S. A., Shmakova M. V.* A deterministic-stochastic modeling of mass transfer in the catchment-reservoir system. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika.* 2018, 11, 2, 55—65.

doi: 10.7868/S207366731804007X

at the end of the forecast. These values are entered in the stochastic weather model instead of the current values, and the predicted series of input data for deterministic models are generated. The result of modelling is a distribution functions of required quantities at the end of the climate forecast.

Key words: catchment, nutrient load, sediments, reservoir, climate, forecast.

Необходимым условием создания системы охраны и рационального использования водного объекта, а также управления его ресурсами является наличие математических моделей, позволяющих количественно оценивать процессы, происходящие в системе водоем-водосбор, а также прогнозировать последствия воздействия на систему антропогенных и климатических факторов. Кроме того следует иметь в виду, что натурные наблюдения за массопереносом в системе водосбор-водоем трудоемки, дорогостоящи, а часто и невозможны. В такой ситуации математическое моделирование является эффективным инструментом теоретического исследования процессов, определяющих функционирование водных объектов.

Для математического описания стока воды с водосбора, формирования внешней нагрузки на водоем за счет поступления растворенных и взвешенных веществ с водосбора, течений и переноса примесей в притоках и в самом водоеме к настоящему времени разработано и верифицировано большое количество различных детерминированных моделей. Это модели формирования стока с водосбора и русловой трансформации паводочной волны [1—3], модели формирования биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора [2, 4, 5], модели транспорта наносов в руслах рек [6, 7], модели гидродинамики водоемов и переноса в них взвешенных частиц [8—12].

Существенно расширить возможности моделирования процессов массопереноса в системе водосбор-водоем удается за счет привлечения детерминировано-стохастического (ДС) подхода [13—15]. Детерминированно-стохастическое моделирование осуществляется с применением как детерминированных, так и стохастических компонентов в рамках единой моделирующей системы. Иногда используется название "динамико-стохастическое моделирование" в случаях акцента на динамику происходящих процессов [1]. При решении задач, связанных с оценкой и прогнозом массопереноса в системе водосбор-водоем, ДС подход позволяет выполнять требуемые расчеты при недостаточности или отсутствии данных натурных наблюдений. Эффективным оказывается ДС моделирование и при оценке последствий реализации различных прогнозных сценариев антропогенных и климатических воздействий.

За последние годы в Институте озероведения РАН разработана ДС моделирующая система, ориентированная на количественную оценку процессов, происходящих в системе водоем-водосбор, а также на прогнозирование последствий воздействия на систему антропогенных и климатических факторов в условиях дефицита данных натурных наблюдений. Блок-схема моделирующей системы представлена на рис. 1. Компонентами системы являются стохастическая модель погоды, модель формирования стока на водосборе, модель выноса с водосбора растворенных примесей, формирующих внешнюю нагрузку на водоем, модель для расчета годового твердого стока рек. А также модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме. Общее описание компонентов системы представлено на рис. 1.

Стохастическая модель погоды — СМП (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614228 от 09.04.2015) разработана в ГГИ под руководством Ю. Б. Виноградова [1] и практически реализована в работе [7]. Модель состоит двух частей, позволяющих выполнять оценку параметров СМП и имитационное моделирование суточных рядов метеорологических величин (температуры воздуха, слоев осадков, дефицита влажности воздуха и продолжительности выпадения осадков). В основе стохастического моделирования погоды лежит метод Монте-Карло. Используется гипотеза о функционально-нормальном законе распределения метеорологических величин, которая позволяет использовать хорошо разработанный для нормального закона распределения корреляционный аппарат. Имитационное моделирование состоит в последовательном генерировании случайных чисел равномерно (для факта выпадения осадков) и нормально (для суточных слоев осадков, температуры и относительной влажности воздуха) распределенных. Эти числа затем в соответствии с параметрами распределения имеющихся рядов измеренных значений, пространственно-временными соотношениями и признаками выпадения осадков пересчитываются в ряды требуемой продолжительности соответствующих метеорологических величин. СМП является блоком генерирования продолжительных

Рис. 1. Схема ДС моделирования массопереноса в системе водосбор-водоем.

Fig. 1. Scheme of DS modeling of mass transfer in the catchment-water body system.

рядов метеорологических элементов, которые затем используются в качестве входа в последующие детерминированные блоки модели. Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы ДС моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем стоковые ряды и, тем более, ряды измеренных значений выноса примесей с водосбора и их транспорта в водоеме.

Модель формирования стока на водосборе ILHM — Institute of Limnology Hydrological Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015). Разработана в Институте озероведения РАН [2] 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 озерности, т. е. доли площади водоемов в общей площади водосбора.

Модель формирования биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора ILLM — Institute of Limnology Load Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612519 от 27.02.2014). Разработана на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования стока и выноса биогенных веществ с водосборных территорий, поступления биогенных веществ в водоемы [2, 16, 4], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [17]. 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. 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. В последней версии модели для оценки

биогенной нагрузки, сформированной на сельскохозяйственных угодьях, используется метод, предложенный специалистами Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства — ИАЭП [18]. Конечным итогом моделирования является количественная оценка биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора и отдельных ее составляющих.

Модель годового твердого стока (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014). Разработана в Институте озероведения РАН [19] и позволяет рассчитывать параметры кривой распределения расхода наносов через параметры кривой распределения расходов воды и глубины потока. Модель основана на композиционном методе теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов, которая является следствием основного уравнения движения воды и твердого вещества в речном потоке. Рассчитанный расход наносов учитывает вклад как взвешенных, так и влекомых наносов. Параметры сопротивления для речных потоков определяются в соответствии с категорией крупности донных отложений и являются функцией водности потока.

Двумерная модель гидродинамики, транспорта наносов и растворенных примесей в водоеме (Свидетельство о государственной регистрации № 2018615451 от 08.05.2018) основана на совместном решении уравнений «мелкой воды» в двумерной постановке, уравнений турбулентной диффузии растворенной примеси и аналитической формулы расхода наносов [20, 21, 10]. Модель позволяет рассчитывать не только пространственную структуру течений и траектории распространения примеси на акватории при различном ветровом воздействии и стоке с водосбора, но и вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водоема. При изменении гидродинамических характеристик потока меняется и его транспортирующий потенциал в отдельных ячейках расчетной сетки. В зависимости от изменения транспортирующего потенциала потока соответствующая масса наносов или осаждается на дно, или, наоборот, вымывается с площади рассматриваемой ячейки и переносится в соседние.

В настоящей моделирующей системе отсутствует блок, описывающий водную эрозию на водосборе. Практически все известные математические модели водноэрозионных процессов предназначаются для использования на небольших сельскохозяйственных водосборах [22]. При увеличении площади водосбора возрастает роль русловых процессов в формировании твердого стока. Частицы наносов, поступившие с водосбора, неоднократно переотлагаются в русле, прежде чем достигают замыкающего створа, превращаясь фактически в русловые наносы. Количественная оценка руслового стока наносов в рассматриваемой моделирующей системе описывается моделью годового твердого стока.

В последнее время в работах Института озероведения ДС моделирование является наиболее востребованным при решении задач, связанных с оценкой стока и биогенной нагрузки, сформированных на водосборных территориях. Примером могут служить расчеты биогенной нагрузки на Онежское и Чудско-Псковское озера, а также на Финский залив Балтийского моря [23, 24, 25].

ДС моделирование стока и выноса биогенных веществ с водосбора Онежского озера. Онежское озеро — второй по величине пресноводный водоём Европы. Площадь озера составляет 9720 км^2, площадь водосбора — 53100 км^2 [24]. Водосбор Онежского озера является частью водосбора Финского залива Балтийского моря, улучшению экологического состояния которого в настоящее время уделяется большое внимание со стороны международных организаций и, прежде всего, Хельсинкской комиссии ХЕЛКОМ [26]. При решении этой задачи для оценки различных типов площадей поверхности водосбора применялись данные космической съемки космического аппарата Landsat-8 Геологической службы США (USGS - United States Geological Survey, http://earthexplorer.usgs.gov) , находящиеся в режиме свободного доступа. Результаты ДС моделирования стока и диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро с водосбора, рассчитанные по имеющимся данным об интенсивности источников поступления биогенных веществ и с использованием космической информации о структуре изучаемого водосбора, представлены в табл. 1. Средние значения диффузной нагрузки общим фосфором и общим азотом на Онежское озеро с Российской части водосбора составляют 669 тР/год, 11981 тN/год, ее природной составляющей — 498 тР/год, 6781 тN/год). Кроме того, в табл. 1 приведены их средние квадратичные отклонения, а также значения нагрузки, рассчитанные для многоводных (обеспеченностью 1 и 5 %) и маловодных (обеспеченностью 95 и 99 %) лет. Из данных табл. 1 следует, что существенное увеличение нагрузки приходится на многоводный период, что объясняется прямой связью значений биогенной нагрузки и стока.

Таблица 1

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока H (мм/год), диффузной нагрузки общим фосфором LP_{dif} и общим азотом LN_{dif} (т/год) на Онежское озеро со стороны водосбора, природные составляющие нагрузки LP_{nat} и LN_{nat}: $X_{ср}$ — среднее значение, σ — среднее квадратичное отклонение, X_i — значения стока и нагрузки обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99 %

Distribution parameters of calculated annual runoff H (mm/year), diffuse total phosphorus LP_{dif} and total nitrogen LN_{dif} loads (t/year) on Lake Onega from the catchment area, natural loads LP_{nat} and LN_{nat}: $X_{ср}$ — mean value, σ - mean deviation, X_i — runoff and load with a probability of exceeding 1, 5, 25, 75, 95 and 99 %

	$X_{ср}$	σ	$X_{1\,\%}$	$X_{5\,\%}$	$X_{25\,\%}$	$X_{75\,\%}$	$X_{95\,\%}$	$X_{99\,\%}$
H	322	49	436	403	355	289	241	208
LP_{dif}	669	165	1053	941	780	558	397	285
LP_{nat}	498	127	794	708	583	413	288	202
LN_{dif}	11981	2628	18114	16324	13744	10218	7638	5848
LN_{nat}	6781	1534	10355	9312	7809	5753	4250	3207

Для оценки адекватности модели реальным условиям формирования биогенной нагрузки на Онежское озеро использованы результаты расчетов, выполненных сотрудниками Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН), согласно которым диффузная нагрузка на озеро составляет 645 тР/год, 12029 тN/год. Приведенная оценка была осуществлена по результатам наблюдений за биогенным стоком с речными водами, атмосферными осадками, подземными водами, разгружающимися в озеро, антропогенному биогенному стоку с селитебных территорий и от сельско- и лесохозяйственных объектов. Результаты расчета биогенной нагрузки, как по модели, так и по натурным данным весьма близки между собой, что является подтверждением достоверности результатов моделирования.

ДС моделирование стока и выноса биогенных веществ с водосбора Чудско-Псковского озера. Чудско-Псковское озеро является крупнейшим трансграничным водоемом Европы. Площадь озера составляет 3555 км², площадь водосбора — 44000 км², из которой 26 % находится в Эстонии, 67 % — в России и 7 % — в Латвии [25]. Вынос азота и фосфора из Чудского озера также формирует биогенную нагрузку на Балтику и находится под пристальным вниманием ХЕЛКОМ [26]. При решении этой задачи для оценки площадей различных типов поверхности водосбора также применялись данные космической съемки. В табл. 2 приведены параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока с водосбора, средние значения диффузной нагрузки общим фосфором и общим азотом (400 тР/год, 8549 тN/год), ее природной составляющей (269 тР/год, 3573 тN/год) на Чудско-Псковское озеро с Российской части водосбора. Представлены средние квадратичные отклонения рассчитанных значений стока и нагрузки, а также значения, рассчитанные для многоводных и маловодных лет. Нетрудно видеть, что изменчивость стока в зависимости от метеорологических параметров более существенна по сравнению с изменчивостью биогенной нагрузки. Сказанное объясняется тем, что не все источники нагрузки напрямую зависят от водности года.

По данным мониторинга СЗУГМС Росгидромета для створа, расположенного на реке Великой ниже Пскова, среднее значение выноса фосфора за маловодный период 2010—2015 гг. со средней обеспеченностью по стоку 75—95 % составило 253.0 т/год. Площадь водосбора Великой (створ — Псков) составляет лишь часть (≈ 0.75) всего Российского водосбора. Исходя из сказанного можно заключить, что имеющиеся данные натурных наблюдений соответствуют результатам расчетов, приведенных в табл. 2.

ДС моделирование возможных климатических воздействий на массоперенос в водных объектах частного водосбора Финского залива. Для Российского частного водосбора Финского залива, неконтролируемого в настоящее время системой мониторинга Росгидромета, выполнена оценка стока и биогенной нагрузки, как в настоящих условиях, так и в результате реализации различных сценариев изменений климата [23]. Протяженность северного побережья от границы с Финляндией до

Таблица 2

Результаты ДС моделирования стока и биогенной нагрузки, сформированной на Российской части водосбора Чудско-Псковского озера (обозначения — см. табл.1)

Results of DS modeling of runoff and nutrient load on Lake Chudsko-Pskovskoye from the Russian part of the catchment area (designations — see table 1)

	$X_{ср}$	σ	$X_{1\,\%}$	$X_{5\,\%}$	$X_{25\,\%}$	$X_{75\,\%}$	$X_{95\,\%}$	$X_{99\,\%}$
H, мм/год	242	57	375	336	281	204	148	110
LP_{dif}, т/год	**400**	81	590	535	455	345	265	210
LP_{nat}, т/год	269	50	387	353	303	235	185	151
LN_{dif}, т/год	**8549**	2013	13239	11870	9898	7200	5228	3859
LN_{nat}, т/год	3573	841	5533	4961	4136	3010	2185	1613

г. Санкт-Петербурга составляет около 132 км, общая водосборная площадь — 5262 км^2. Протяженность южного побережья от г. Санкт-Петербурга до устья р. Луги — около 118 км, общая водосборная площадь — 3903 км^2. Прогностический период охватывал 2009—2099 гг. Использовались результаты сценарных расчетов на основе немецкой модели ECHAM5/MPI-OM по сценариям A2 (максимальная эмиссия CO_2 в атмосферу) и B1 (минимальная эмиссия CO_2 в атмосферу). Входная информация, необходимая для прогностической оценки возможных изменений стока и фосфорной нагрузки на Финский залив, приведена в табл. 3.

По заданным прогностическим характеристикам климатических сценариев (табл. 3) с использованием СМП генерировались ряды температуры воздуха и осадков продолжительностью 100 лет. После чего эти прогнозные ряды поступали на вход детерминированных моделей стока и биогенной нагрузки. Полученные результаты представлены на рис. 2 в виде функций распределения фосфорной нагрузки на

Таблица 3

Прогноз изменений температуры воздуха и осадков в Балтийском регионе к 2099 г.

Forecast of air temperature and precipitation changes in the Baltic region by 2099

Модель, сценарий	Рост средней годовой температуры за 100 лет, °C	Рост средних годовых осадков за 100 лет, мм/сут
ECHAM A2	6.0	0.39
ECHAM B1	4.2	0.05

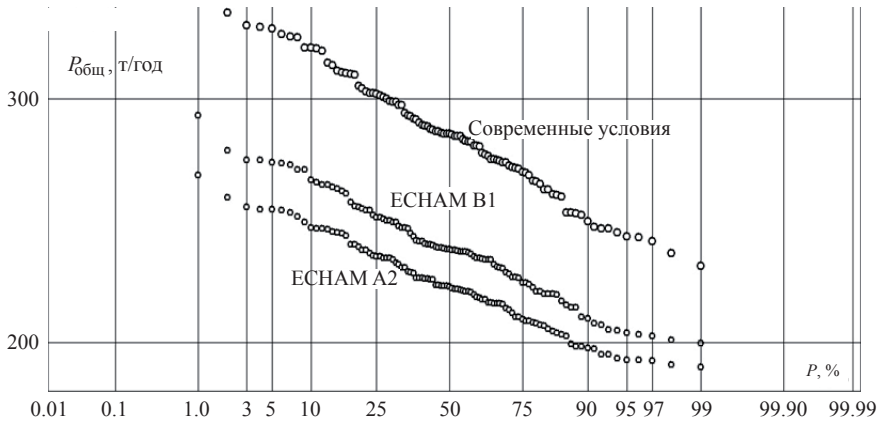

Рис. 2. Функции распределения значений фосфорной нагрузки на Финский залив с Российского водосбора в современных условиях и в предположении о реализации климатических сценариев ECHAM A2 и ECHAM B1.

Fig. 2. The distribution functions of phosphorus load on the Gulf of Finland from the Russian catchment in modern conditions, and in the assumption of the implementation of the climate scenarios ECHAM A2 and ECHAM B1.

Финский залив, рассчитанных для современных условий и в предположении о реализации рассмотренных климатических сценариев.

Количественная оценка средних значений, средних квадратичных отклонений и значений различной обеспеченности стока, фосфорной нагрузки на Финский залив и ее природной составляющей приведена в табл. 4. Как показали результаты расчетов, реализация рассмотренных климатических сценариев может привести к существенному снижению стока с водосбора Финского залива — на 47 % для ECHAM A2 и 35 % для ECHAM B1 по отношению к современному уровню. Снижение фосфорной нагрузки не столь значительно — на 22 % для ECHAM A2 и 16 % для ECHAM B1. Объяснением может служить то, что не все источники нагрузки зависят от стока.

Однако спектр возможных сценариев эмиссии CO_2 в атмосферу очень разнообразен [27]. Разработано также и значительное число моделей общей циркуляции атмосферы и океана, использующих в расчетах различные граничные условия. В настоящий момент представляется крайне затруднительным отдать предпочтение какому-либо сценарию и какой-либо модели. Поэтому в рамках настоящего исследования с помощью предложенной ДС модели выполнена серия имитационных расчетов для выявления общей направленности воздействия изменения климатических параметров на формирование стока и фосфорной нагрузки на Финский залив с Российского водосбора. На рис. 3 представлена граница равновесного воздействия, разделяющая области увеличения и уменьшения стока и биогенной нагрузки для изучаемого объекта. То есть, если реализация климатического сценария приведет к изменению температуры воздуха и осадков, значения которых лежат выше представленной линии, то результатом явится повышение стока и биогенной нагрузки. Если ниже — последует снижение указанных характеристик.

В пределах рассмотренной выше водосборной территории Финского залива расположено несколько объектов исследования Института озероведения РАН. К их числу относятся Дудергофские озера, расположенные на южной границе Санкт-Петербурга, и водохранилище Сестрорецкий Разлив на северной границе города.

Дудергофские озера расположены в Красносельском районе Санкт-Петербурга вблизи посёлков Дудергоф и Виллози. Суммарная площадь трех озер составляет 0.83 км^2, водосбора — 55.6 км^2. Их берега являются зоной рекреации. Основная часть водосбора озер приходится на территории Ломоносовского и Гатчинского районов Ленинградской области. Указанные районы являются одними из наиболее

Таблица 4

Результаты ДС моделирования стока и фосфорной нагрузки, сформированной на российской части водосбора Финского залива в настоящее время и в случаях реализации климатических сценариев ECHAM A2 и ECHAM B1 (обозначения — см. табл. 1)

Results of DS modeling of runoff and phosphorus load on the Gulf of Finland from the russian part of the catchment area now and in cases of implementation of climate scenarios ECHAM A2 and ECHAM B1 (designations — see table 1)

	$X_{ср}$	σ	$X_{1\,\%}$	$X_{5\,\%}$	$X_{25\,\%}$	$X_{75\,\%}$	$X_{95\,\%}$	$X_{99\,\%}$
Настоящее время								
H, мм/год	304	57.5	438	399	343	265	209	170
LP_{dif}, т/год	285	25.1	343	326	302	268	244	227
LP_{nat}, т/год	84.2	13.2	115	106	93	75	62	53
ECHAM A2								
H, мм/год	161	41.9	259	230	189	133	92	63
LP_{dif}, т/год	223	18.3	266	253	235	211	193	180
LP_{nat}, т/год	51.5	9.61	74	67	58	45	36	29
ECHAM B1								
H, мм/год	197	46.7	306	274	228	166	120	88.2
LP_{dif}, т/год	239	20.4	286	272	252	225	205	191
LP_{nat}, т/год	59.8	10.7	85	77	67	53	42	35

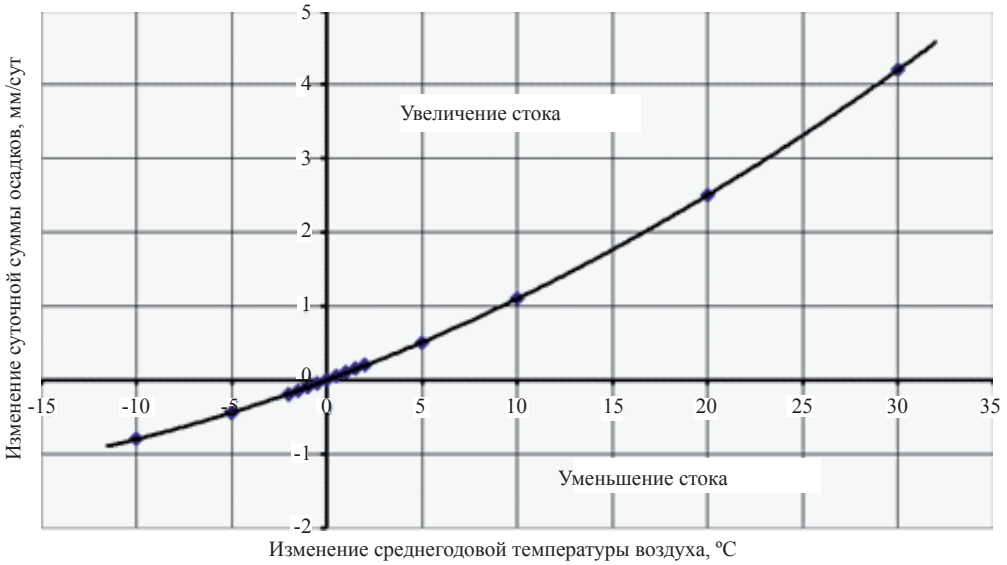

Рис. 3. Граница равновесного воздействия, разделяющая области увеличения и уменьшения стока и выноса биогенных веществ с исследуемого водосбора.

Fig. 3. The boundary of the equilibrium effect, dividing the areas of increase and decrease in runoff and removal of nutrients from the studied catchment area.

развитых районов Ленинградской области в сфере сельскохозяйственного производства. Согласно данным космического наблюдения в границах водосбора Дудергофских озер возделывается около 22.8 км^2 сельскохозяйственных земель, Здесь же расположены крупные животноводческие и птицеводческие объекты.

Водохранилище создано в 1723 г. на р. Сестре вблизи ее устья для нужд Сестрорецкого оружейного завода. Площадь водоема составляет 10.03 км^2, водосбора — 566 км^2. Берега Разлива также являются зоной рекреации. Крупные сельскохозяйственные объекты на водосборе отсутствуют. Основными притоками являются реки Сестра с площадью водосбора 399 км^2 и Черная (126 км^2). Пристальное внимание к водохранилищу, расположенному в курортно-оздоровительной зоне Санкт-Петербурга, обусловлено еще и тем, что оно используется как источник питьевого водоснабжения, что требует специального режима его эксплуатации. Одной из проблем мелководного Сестрорецкого Разлива является заиление [28].

Результаты ДС моделирования стока для водосбора Финского залива (табл. 4) использованы для ДС оценки биогенной нагрузки, сформированной на водосборах Дудергофских озер и Сестрорецкого Разлива и представленной в табл. 5. Расчеты показали, что удельная фосфорная нагрузка на единицу площади акватории Дудергофских озер, составляющая 1.22 т/км^2, превышает аналогичную величину для Сестрорецкого Разлива (0.99 т/км^2). Причиной является различная степень сельскохозяйственной освоенности водосборов.

Применительно к условиям Сестрорецкого Разлива и его водосбора ДС моделирование использовалось также для количественной оценки годового стока наносов с водосбора и среднего по акватории заиления водохранилища речными наносами. В табл. 6 представлены рассчитанные значения годового твердого стока с водосбора и средней скорости заиления речными наносами Сестрорецкого Разлива, как в настоящее время, так и при условии реализации рассмотренных выше сценариев возможных климатических изменений в регионе. Средняя по акватории интенсивность заиления рассчитывалась путем равномерного распределения оставшихся в водоеме речных наносов с учетом их последующей плотности залегания [29, 30].

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о том, что как в настоящее время, так и при численной реализации рассмотренных климатических сценариев поступление речных наносов в Сестрорецкий Разлив составляет доли мм/год, то есть интенсивность заиления речными наносами акватории Разлива крайне незначительная.

Таблица 5

Результаты ДС моделирования фосфорной нагрузки, сформированной на водосборах Дудергофских озер и водохранилища Сестрорецкий Разлив (обозначения — см. табл. 1)

Results of DS modeling of runoff and phosphorus load on Lake Dudergofskoye and Reservoir Sestroretskiy Razliv (designations — see table 1)

	$X_{ср}$	σ	$X_{1\,\%}$	$X_{5\,\%}$	$X_{25\,\%}$	$X_{75\,\%}$	$X_{95\,\%}$	$X_{99\,\%}$
Дудергофские озера								
LP_{dif}, т/год	1.01	0.18	1.46	1.30	1.12	0.89	0.71	0.56
LP_{nat}, т/год	0.52	0.12	0.80	0.71	0.60	0.44	0.33	0.26
Сестрорецкий Разлив								
LP_{dif}, т/год	9.99	0.99	13.96	11.59	8.30	5.96	4.33	13.96
LP_{nat}, т/год	8.43	0.80	11.61	9.75	7.08	5.14	3.80	11.61

Таблица 6

Рассчитанные значения годового твердого стока с водосбора и средней по акватории скорости заиления в различных климатических условиях

Calculated annual sediment runoff from the Sestroretskiy Razliv catchment area and the area average silting rate in different climatic conditions

	Настоящее время	ECHAM A2	ECHAM B1
Годовой твердый сток притоков, т/год	3500	1862	2258
Скорость заиления, мм/год	0.1	0.05	0.07

Распределение наносов по акватории (взмыв и отложение наносов в водохранилище) описывалось с помощью модели гидродинамики и транспорта наносов. На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования переформирования дна Сестрорецкого Разлива (мм/декада) для расчета стационарного режима при среднегодовом расходе воды 5 и 95 % обеспеченности в современных условиях и при реализации климатического сценария ECHAM A2.

Как видно из приведенных рисунков особенности морфометрии водохранилища, а также расположение источников и стока относительно друг друга, способствуют неравномерному распределению

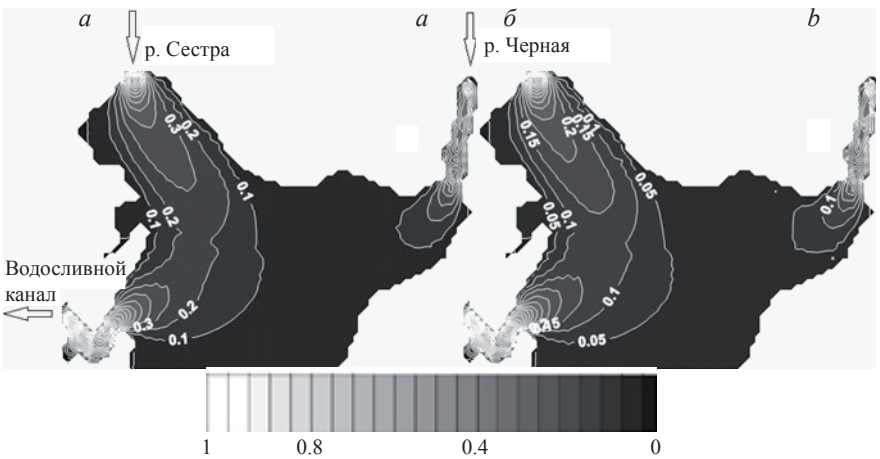

Рис. 4. Переформирование дна Сестрорецкого Разлива (мм/декада) при среднегодовом стоке с водосбора обеспеченности 5 % в современных условиях (*а*) и при реализации климатического сценария ECHAM A2 (*б*).

Fig. 4. Reforming the bottom of the Sestroretsky Razliv reservoir (mm/decade) at high (5 %) annual runoff in catchment for current conditions (*a*) and for the implementation of the climate scenario ECHAM A2 (*b*).

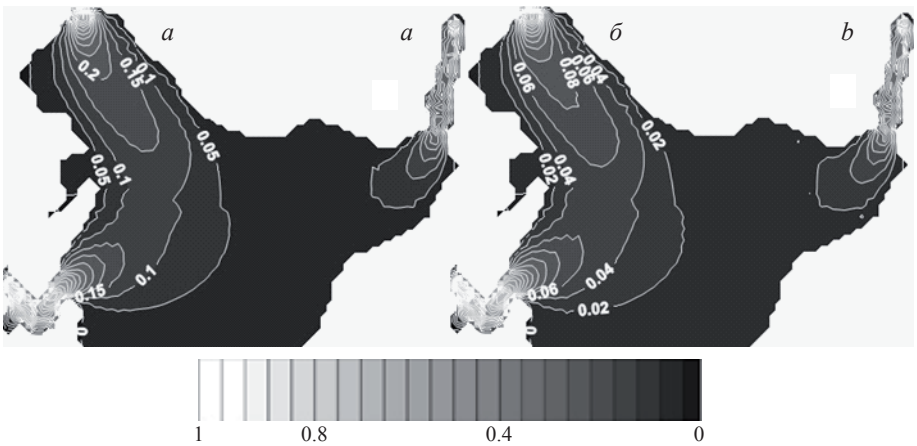

Рис. 5. Переформирование дна Сестрорецкого Разлива (мм/декада) при среднегодовом стоке с водосбора обеспеченности 95 % в современных условиях (*а*) и при реализации климатического сценария ECHAM A2 (*б*).

Fig. 5. Reforming the bottom of the Sestroretsky Razliv reservoir (mm/decade) at low (95 %) annual runoff in catchment for current conditions (*a*) and in the implementation of the climate scenario ECHAM A2 (*b*).

поступивших с притоками речных наносов. Это отражается как на значениях расходов наносов, так и интенсивности переформирования дна. Перенос речных наносов по акватории, являющийся функцией скорости течения, наиболее выражен в северной части водоема в местах впадения притоков и стока. Для периода малой водности характерно уменьшение скоростей течения, что влечет за собой снижение интенсивности переформирования дна. В случае реализации климатического сценария ECHAM A2 уменьшение водности повлечет за собой уменьшение твердого стока притоков и, как следствие, снижение заиления водоема.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что модель позволяет выявить возможные изменения скорости заиления и перераспределения наносов по акватории в различных климатических ситуациях. Однако, как в настоящее время, так и при условии реализации рассмотренных климатических сценариев, поступление речных наносов в Сестрорецкий Разлив, а также соответствующие изменения отметок дна, составляют доли мм в год. То есть интенсивность заиления водохранилища именно речными наносами незначительна. В дальнейших работах по изучению заиления Разлива следует уделить внимание оценке осаждения на дно автохтонного вещества, образовавшегося непосредственно в экосистеме водоема.

Выводы. Разработанная в Институте озероведения РАН детерминировано-стохастическая моделирующая система, описывающая массоперенос в системе водосбор-водоем, в настоящее время может достаточно эффективно использоваться при решении двух типов задач. Это, прежде всего, задачи, связанные с моделированием массопереноса в системе водосбор-водоем в условиях недостатка данных натурных наблюдений, когда стохастическая модель погоды используется в качестве генератора продолжительных рядов метеорологических величин (осадков и температуры воздуха). Полученные ряды поступают на вход детерминированных моделей, а итогом моделирования являются не только средние значения искомых величин, но и параметры их функции распределения. Также рассчитываются функции распределения твердого стока и характеристики массопереноса на акватории для различных ситуаций, сформированных экстремальными метеоусловиями.

Следующий тип задач — оценка воздействия возможных климатических изменений на изучаемые процессы. В этом случае по климатическому сценарию определяются прогнозные значения осадков и температуры воздуха на момент окончания прогноза. Эти значения вводятся в стохастическую модель погоды вместо современных значений и генерируются соответствующие прогнозные ряды входных величин для детерминированных моделей. Результат расчета — функции распределения искомых величин на момент окончания климатического прогноза. Рассчитываются также и характеристики массопереноса на акватории озера для различных климатических ситуаций.

Следует отметить, что в зависимости от постановки конкретной задачи может использоваться как вся моделирующая система, так и ее отдельные компоненты в различных сочетаниях.

Перспективы дальнейшего совершенствования и развития моделирующей системы связаны с дополнением ее блоков, описывающих не только массо- но и теплоперенос в системе водосбор-водоем.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2018-0003 (№ гос. регистрации 01201363379) при частичном финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета.

Литература

1. *Виноградов Ю. Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 312 с.
2. *Кондратьев С. А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 255 с.
3. *Кучмент Л. С.* Математическое моделирование речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 191 с.
4. *Behrendt H., Dannowski R.* Nutrients and heavy metals in the Odra River System. Weissensee Verlag Publ., Germany, 2007. 337 p.
5. *Ruskule E.* Water Quality Models Description - Environment. Technology // Resources. 2011. V. 1. P. 112—119.
6. *Зиновьев А. Т., Марусин К. В., Шибких А. А., Шлычков В. А., Затинацкий М. В.* Моделирование русловых процессов для оценки влияния расчистки русла // Ползуновский вестник. 2006. № 2. С. 197—203.
7. *Шмакова М. В.* Стохастическая Модель Погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока / Автореферат диссертации на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. СПб.: ГГИ, 2000. 25 с.
8. *Мартьянов С. Д., Рябченко В. А.* Воспроизведение взмучивания и переноса донных осадков в Невской губе на основе трехмерной модели циркуляции // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 4. С. 32—43.
9. *Рахуба А. В., Шмакова М. В.* Численное моделирование заиления приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища речными наносами // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 68—75.
10. *Шмакова М. В., Кондратьев С. А., Маркова Е. Г.* Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 61—69.
11. *Askers P., White W. R.* Sediment Transport: New Approach on Analysis // Journal of Hydraulics division. ASCE. 1973. No. HY 11. P. 2041—2060.
12. *Engelund F., Hansen E.* A monograph on Sediment transport In Alluvial Streams // Nordic Hydrology. 1967. N 7. P. 153—168.
13. *Гельфан А. Н.* Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 280 с.
14. *Шмакова М. В., Кондратьев С. А.* Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 74—84.
15. *Ailliot P., Allard D., Monbet V., Naveau Ph.* Stochastic weather generators: an overview of weather type models. February 20, 2015. 14 p. https://perso.univ-rennes1.fr/valerie.monbet/doc/papiers_pdf/SWGEN_review.pdf (Дата обращения: 16.03.2018).
16. *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.
17. Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). HELCOM Publ., Helsinki, Finland, 2005. 80 p.
18. *Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Обломкова Н. С., Огуздин А. С., Субботин И. А.* Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175—183.
19. *Шмакова М. В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Изд-во Лема, 2013. 142 с.
20. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под ред. А. В. Караушева. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 288 с.
21. *Стокер Д. Д.* Волны на воде. М.: Изд-во Иностр. лит., 1959. 617 с.
22. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна / Под ред. Керженцева А. С., Майснера Р. М.: Наука, 2006. 224 с.
23. *Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Викторова Н. В., Уличев В. И.* Фосфорная нагрузка на Финский залив с прибрежной территории России // Вестник РАН. 2014. Т. 84, № 10. С. 913—919.
24. *Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Маркова Е. Г., Лозовик П. А., Брюханов А. Ю., Чичкова Е. Ф.* Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования // Изв. РГО. 2016. № 148, вып. 5. С. 53—63.
25. *Кондратьев С. А., Мельник М. М., Шмакова М. В.* Опыт математического моделирования и прогнозирования внешней биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с российской части водосборного бассейна // Региональная экология. 2017. № 2 (48). С. 26—34.
26. HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, Finland, 2007. 103 p.
27. Сценарии выбросов // Специальный доклад рабочей группы III МГЭИК, Межправительственная группа экспертов по изменению климата ВМО-ЮНЕП, 2000. 20 с.
28. *Шмакова М. В., Кондратьев С. А.* Гидродинамическое моделирование течений и транспорта наносов в водоеме при наличии макрофитов (на примере Сестрорецкого Разлива) // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 49. С. 108—113.
29. Водные объекты Санкт-Петербурга / Под ред. С. А. Кондратьева, Г. Т. Фрумина. СПб.: Символ, 2002. 348 с.
30. Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СО 34.21.204-2005. СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2006.