

ГЛОБАЛЬНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИС: МИФЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

УДК 556.55; 504.4
ББК D 225.23+c18+D225.51

С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова

ОПЫТ СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ПРОЦЕССЫ СТОКА И ВЫНОСА ПРИМЕСЕЙ С ВОДОСБОРА

Представлено краткое описание математических моделей, используемых в настоящее время сотрудниками Института озераедения РАН для решения различных задач, связанных с моделированием процессов теплопереноса в системе «водосбор–река–водоем» и зарегистрированных Федеральной службой по интеллектуальной собственности РФ. К их числу относятся: стохастическая модель погоды, модель стока с водосбора, модель формирования биогенной нагрузки на водосборе, модель движения твердого вещества в речном потоке, модель годового твердого стока рек и метод расчета допустимых сбросов примесей в водные объекты.

Ключевые слова:

биогенная нагрузка, математическая модель, сток, транспорт наносов.

Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Опыт создания математических моделей, описывающих процессы стока и выноса примесей с водосбора // Общество. Среда. Развитие. – 2017, № 1. – С. 80–84.

© Кондратьев Сергей Алексеевич – доктор физико-математических наук, заместитель директора, Институт озераедения Российской академии наук, Санкт-Петербург; e-mail: kondratyev@limno.org.ru

© Шмакова Марина Валентиновна – кандидат технических наук, Институт озераедения Российской академии наук, Санкт-Петербург; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Для успешного решения задач, связанных с моделированием и прогнозированием возможных изменений процессов в системе «водосбор – река – водоем», специалист должен иметь в своем распоряжении систему моделей, описывающих наиболее важные происходящие процессы с различной степенью детализации. В данном случае уместно говорить о «банке моделей» по аналогии с банками данных. При этом модели должны работать как в комплексе, так и самостоятельно [5, с. 40].

В настоящей статье представлено краткое описание математических моделей, используемых в настоящее время сотрудниками Института озераедения РАН для решения различных задач, связанных с моделированием процессов теплопереноса в системе «водосбор–река–водоем» и зарегистрированных Федеральной службой по интеллектуальной собственности РФ. К их числу относятся: стохастическая модель погоды, модель стока с водосбора, модель формирования биогенной нагрузки на во-

досборе, модель движения твердого вещества в речном потоке, модель годового твердого стока рек и метод расчета допустимых сбросов примесей в водные объекты.

Стохастическая модель погоды – СМП (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614228 от 09.04.2015) создана под руководством Ю.Б. Виноградова [Виноградов, 1988] и практически реализована в работе [14, с. 10]. Модель разработана с целью 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). В блоке оценки параметров аппроксимируется внутригодовой ход значений среднего квадратичного отклонения суточной температуры воздуха, относительной влажности воздуха, сред-

него квадратичного отклонения суточной относительной влажности воздуха, вероятности выпадения осадков, а также средней относительной величины выпавших осадков [14, с. 10]. Имитационное моделирование заключается 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, пространственно-временными соотношениями и признаками выпадения осадков пересчитываются в значения соответствующих метеорологических величин. Так как разные годы характеризуются различными средними значениями температуры воздуха, осадков и относительной влажности воздуха, в СМП учитываются эти различия посредством моделирования случайной добавки к среднему значению, на которое затем накладывается известный внутrigодовой ход.

Разработанная СМП реализована в детерминировано-стохастических моделях формирования стока и биогенной нагрузки на водосборах Онежского [11, с. 55], Ладожского [10, с. 26] и Чудско-Псковского [8, с. 164] озер, а также на частном водосборе Финского залива [12, с. 20].

Модель формирования стока с водосбора *ILLM* – Institute of Limnology Hydrological Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015) разработана в Институте озероведения РАН [5, с. 40; 10, с. 26; 13, с. 100] 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.

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) [13, с. 100; 10, с. 26; 5, с. 40] и Финляндии (водосборы рек Мустаййоки и Харайоки) [6, с. 54]. В настоящее время 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.

Модель формирования биогенной нагрузки на водосборе *ILLM* – Institute of Limnology Load Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612519 от 27.02.2014) разработана в Институте озероведения РАН на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования выноса биогенных веществ с водосборных территорий [5, с. 40; 7, с. 55; 22, с. 250], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [23, с. 22]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой нагрузки общим фосфором ($P_{общ}$) и общим азотом ($N_{общ}$), сформированной различными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. В том числе – для научного обоснования мероприятий по выполнению рекомендаций Плана действий по Балтийскому морю ХЕЛКОМ [24, с. 10] в отношении снижения биогенной нагрузки на экосистему Балтийского моря. Модель ориентирована на существующие ограниченные 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. Конечным итогом моделирования является количественная оценка биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора и отдельных ее составляющих.

Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных в Северо-Западном регионе России на водосборах рек Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка [7, с. 55], а также притоков Онежского озера [19, с.186]. По результатам выполнения проекта ЕС BaltHazAR II [21, с. 24] сделан вывод о том, что «модель *ILLM* может использоваться для расчета биогенной нагрузки на

Балтийское море для неконтролируемых и частично контролируемых водосборов в Российской части водосборного бассейна» В выводах Российско-шведского проекта Rus-NIP II [20, с. 47] говорится о том, что «модель ILLM наиболее удобна для использования в относительно крупных водосборах». Кроме того, в 2016 г. с использованием упомянутой выше модели выполнена оценка современной биогенной нагрузки на Финский залив с неконтролируемых государственным мониторингом Российских территорий [18, с. 151]. Полученная в результате расчетов по модели ILLM информация внесена в базу данных ХЕЛКОМ по нагрузке на Балтийское море.

Модель движения воды и твердого вещества (Свидетельство о государственной регистрации № 2016612803 от 10.03.2016) разработана в Институте озераедения РАН и предназначена для расчета переменных состояния двухфазного речного потока – глубины, скорости потока и расхода наносов. Модель квазитрехмерная, выполняющая расчеты с шагом по времени несколько секунд [15, с. 27]. В модели представлен взаимосвязанный расчет переменных состояния потока и твердого вещества, полученный их баланса системы «водный поток – донные отложения – наносы». Взаимодействие движущегося потока воды и подстилающей поверхности представлено не традиционным эмпирическими соотношениями типа формулы Шези-Маннинга, а физически обоснованной зависимостью сопротивления грунта сдвигу от давления со стороны потока. Параметрами являются коэффициент внутреннего трения и сцепление частиц грунта сдвигу [1, с. 172].

Модель использована для расчетов неустановившегося течения и переноса примесей в русле реки Невы [16, с. 47].

Модель годового твердого стока рек (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014) разработана в Институте озераедения РАН и предназначена для оценки годового твердого стока при недостаточности данных гидрометрических наблюдений [15, с. 46]. Модель основана на использовании композиционного метода теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов. Композиционный метод позволяет рассчитывать параметры кривой распределения функции через параметры кривой распределения ее аргументов. Аргументами аналитической формулы расхода наносов являются расход воды и средняя глубина потока, функцией – расход наносов. В модели реализовано имитационное моделирование суточных расходов наносов, их пересчет в общий расход наносов и последующая оценка параметров

распределения годового твердого стока. Безусловным достоинством модели служит возможность расчета параметров годового твердого стока при недостаточности данных гидрологических наблюдений.

Модель годового твердого стока использована для расчета заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами, поступившими со стоком рек Сестры и Черной [17, с. 135].

Метод расчета допустимых сбросов примесей в водные объекты (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612805 от 10.03.2016) предназначен для расчета кратностей начального, основного и общего разбавления сточных вод в водных объектах различного типа. Метод позволяет выполнять расчеты допустимых сбросов веществ в водные объекты (водотоки, водохранилища, озера, внутренние и территориальные морские воды РФ) в соответствии с «Методикой разработки нормативов допустимых сбросов (НДС) веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей», утвержденной Министерством природных ресурсов и экологии РФ от 17.12.2007 года. Разработанная программа применяется при расчетах разбавления сточных вод на водовыпусках Северной станции аэрации, КОС п. Репино, КОС г. Кронштадт, КОС г. Петродворец, КОС п. Понтонный, КОС п. Металлострой [3, с. 16].

В качестве примера удачного объединения нескольких из перечисленных выше модельных компонентов может служить детерминировано-стохастическая (ДС) модель формирования биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря [9, с. 915], которая использовалась для оценки возможного изменения фосфорной нагрузки на залив в результате будущих климатических изменений. Схема ДС модели приведена на рис.1.

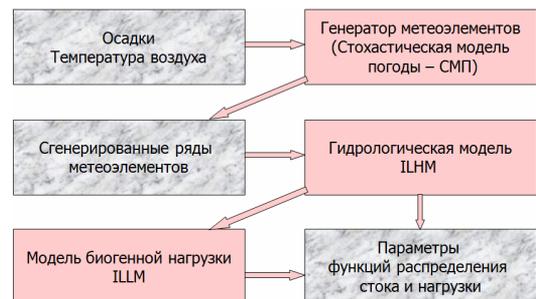


Рис. 1. Схема детерминировано-стохастической модели стока и биогенной нагрузки.

Кроме генератора рядов метеоэлементов в виде СМП построенная ДС модель включает гидрологическую модель форми-

рования стока с водосбора *ILHM* и модель биогенной нагрузки *ILLM*. В рамках ДС моделирования 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, прошедшей верификацию в изучаемом регионе.

5. Моделирование годовых значений нагрузки по модели биогенной нагрузки, прошедшей верификацию в изучаемом регионе.

6. Оценка параметров распределения годовых значений стока и биогенной нагрузки (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).

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

Модель использована для решения задачи оценки возможного изменения стока и выноса фосфора с Российского частного водосбора Финского залива в результате реализации различных сценариев изменений климата. Прогностический период охватывал 2009 – 2099 гг. Использовались результаты сценарных расчетов на основе немецкой модели ЕСНАМ5/MPI-ОМ по

сценариям А2 (максимальная эмиссия CO_2 в атмосферу) и В1 (минимальная эмиссия CO_2 в атмосферу). Входная информация, необходимая для возможных изменений стока и фосфорной нагрузки на Финский залив, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Прогноз изменений температуры воздуха и осадков в Балтийском регионе к 2099 г. [4, с. 26]

Модель, сценарий	Рост средней годовой температуры за 100 лет, °С	Рост средних годовых осадков за 100 лет, мм/сут
ЕСНАМ А2	6,0	0,39
ЕСНАМ В1	4,2	0,05

По заданным характеристикам климатических сценариев с использованием СМП генерировались ряды температуры воздуха и осадков продолжительностью 100 лет, после чего расчеты выполнялись в порядке, изложенном выше. Полученные результаты представлены на рис. 2 в виде функций распределения фосфорной нагрузки на Финский залив, рассчитанных для современных условий и в предположении о реализации рассмотренных климатических сценариев.

Как показали результаты расчетов, реализация рассмотренных климатических сценариев может привести к существенному снижению стока с водосбора Финского залива: на 47% для ЕСНАМ А2 и на 35% для ЕСНАМ В1 по отношению к современному уровню. Объяснением может служить увеличение испарения с поверхности водосбора за счет повышения температуры воздуха. Снижение фосфорной нагрузки не столь значительно: на 22% для ЕСНАМ

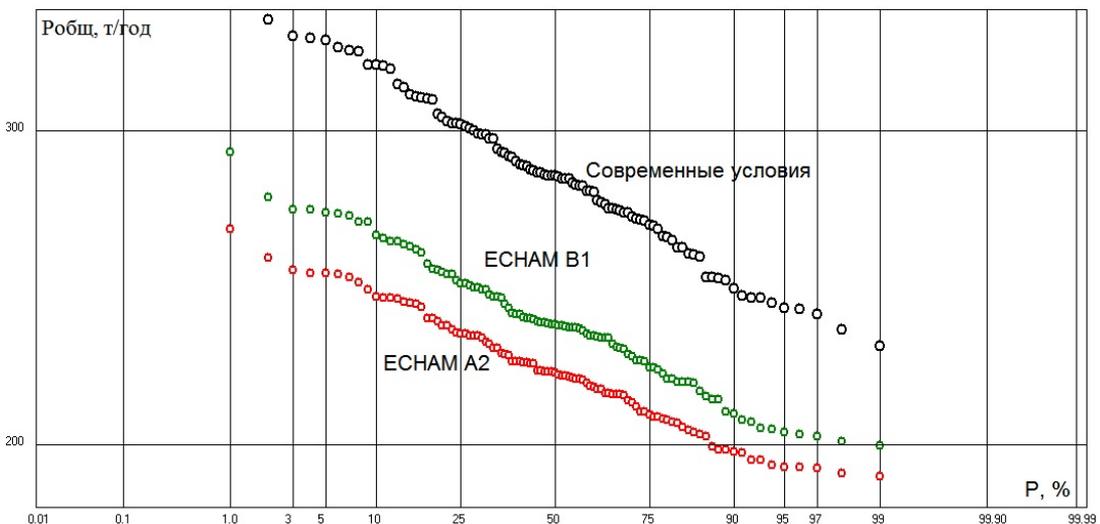


Рис. 2. Функции распределения значений фосфорной нагрузки на Финский залив с российского водосбора в современных условиях и при реализации климатических сценариев ЕСНАМ А2 и ЕСНАМ В1.

84 А2 и на 16% для ЕСНАМ В1, так как не все источники нагрузки зависят от стока.

Таким образом, к настоящему времени разработан и доведен до стадии практического применения ряд математических моделей, описывающих процессы стока воды и переноса примесей как на водосборе, так

и в водных объектах. Естественно, для создания полноценного «банка моделей» их перечень должен быть существенно расширен. Именно над этой задачей и работают в настоящее время сотрудники Лаборатории математических методов моделирования Института озерадения РАН.

Список литературы:

- [1] Бабков В.Ф., Быковский Н.И., Гербурт-Гейбович А.В., Тулаев А.Я. Грунтоведение и механика грунтов. – М.: Дориздат, 1950. – 334 с.
- [2] Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока.– Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 312 с.
- [3] Исследование и расчет разбавления сточных вод в водных объектах по выпускам: Северная станция аэрации, КОС п. Репино, КОС г. Кронштадт, КОС г. Петродворец, КОС п. Понтонный, КОС п. Металлострой / Отчет по НИР, Договор № 1/2011 от 10 мая 2011 г. – СПб.: ИНОЗ РАН, 2011. – 25 с.
- [4] Карлин Л.Н. Прогностические оценки влияния изменения климата на экологическое состояние Балтийского моря / Отчет по проекту РФФИ № 09-05-13553. – 2010. – 45 с.
- [5] Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. – СПб.: Наука, 2007. – 255 с.
- [6] 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. Т. 135. – 2003, вып. 6. – С. 29–36.
- [7] 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.
- [8] Кондратьев С.А., Мельник М.М., Шмакова М.В., Уличев В.И. Диффузная биогенная нагрузка на Чудско-Псковское озеро с российской территории в современных условиях // Общество. Среда. Развитие. – 2014, № 3. – С. 163–169.
- [9] Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Викторова Н.В., Уличев В.И. Фосфорная нагрузка на Финский залив с прибрежной территории России // Вестник Российской Академии наук. Т. 84. – 2014, № 10. – С. 913–919.
- [10] Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование стока реки Невы в условиях возможного изменения климата // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016, № 42. – С. 24–32.
- [11] Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Лозовик Н.А., Брюханов А.Ю., Чичкова Е.Ф. Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования // Известия РГО. Т. 148. – 2016, вып. 5. – С. 53–64.
- [12] Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Уличев В.И. Детерминировано-стохастическое моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты (на примере Финского залива Балтийского моря). – СПб.: Нестор-История, 2013. – 36 с.
- [13] Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера) // Труды XII Съезда РГО. – 2005, т. 6. – С. 99–104.
- [14] Шмакова М.В. Стохастическая Модель Погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока / Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб.: Гос. гидрол. ин-т, 2000. – 25 с.
- [15] Шмакова М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. – СПб: Лема, 2013. – 142 с.
- [16] Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Моделирование переноса примеси в реке Нева // Река Нева в экосистеме Северо-Запада России. Сб. научных трудов. – СПб. 2014. – С. 45–52.
- [17] Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Оценка заиления водохранилищ по данным о годовом твердом стоке притоков (на примере Сестрорецкого разлива) // Ученые записки РГГМУ. – 2014, № 34. – С. 134–141.
- [18] Научные исследования в области оценки нагрузки загрязняющих веществ, поступивших с российской части водосборного бассейна в Балтийское море в 2014–2015 годах, в соответствии с Руководствами ХЕЛКОМ по периодической и ежегодной оценке загрязнений на Балтийское море / Отчет по проекту НИ-10-23/318, 2-й этап. – СПб.: РГГМУ, 2016. – 208 с.
- [19] Оценка диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро и разработка научно-обоснованных предложений по её снижению. Договор № 57–НИР/ФЦП-2015. – СПб.: ИНОЗ РАН, 2015. – 231 с.
- [20] An improved system for monitoring and assessment of pollution loads from the Russian part of the Baltic Sea catchment for HELCOM purposes – RusNIP II. Implementation of the Baltic Sea Action Plan (BSAP) in Russian Federation. Swedish Environmental Protection Agency, Report 6645. – 2015. – 138 p.
- [21] BaltHazAR II. Component 2.2: Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e.g. HELCOM pollution load compilations. Appendix 3a. Testing the nutrient load model for the River Luga catchment. – HELCOM, 2012. – 29 p.
- [22] Behrendt H., Dannowski R. Nutrients and heavy metals in the Odra River system.– Weissensee Verlag Publ., 2007. – 337 p.
- [23] Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). – Helsinki: HELCOM, 2005. – 80 p.
- [24] HELCOM Baltic Sea Action Plan. – Helsinki: Helsinki Commission Publ, 2007. – 103 p.